

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра электротехники**

**В. Н. ГАЛУШКО, В. А. ПАЦКЕВИЧ, В. Г. ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

## **Часть II** **МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.** **СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

**Учебно-методическое пособие**  
**для самостоятельной проработки курса**

**Гомель 2015**

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

В. Н. ГАЛУШКО, В. А. ПАЦКЕВИЧ, В. Г. ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## Часть II МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

*Одобрено научно-методическим советом механического факультета  
в качестве учебно-методического пособия  
для самостоятельной проработки курса*

Гомель 2015

УДК 621.3 (075.8)  
ББК 31.261  
Г16

Рецензент – заведующий кафедрой «Электрический подвижной состав»  
канд. техн. наук, доцент *В. С. Могила* (УО «БелГУТ»)

**Галушко, В. Н.**

Г16 Электрические машины : учеб.-метод. пособие для самостоятельной проработки курса. В 2 ч. Ч. II. Машины постоянного тока. Синхронные машины / В. Н. Галушко, В. А. Пацкевич, В. Г. Черномашенцев ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 117 с.  
ISBN 978-985-554-487-7 (ч. II)

Пособие состоит из двух частей. Первая часть (Гомель, 2011) касается трансформаторов и асинхронных двигателей. Вторая часть содержит сведения о машинах постоянного тока, синхронных машинах и вентильно-индукторных двигателях. Пособие содержит теоретическую часть и учебно-методические материалы, необходимые для самостоятельной проработки курса студентами. Отмеченные материалы обеспечивают самоконтроль усвоения информации и исправление возможных ошибок.

Предназначено для студентов механического факультета дневной и заочной формы обучения.

**УДК 621.3 (075.8)**  
**ББК 31.261**

**ISBN 978-985-554-487-7 (ч. II)** © Галушко В. Н., Пацкевич В. А., Черномашенцев В. Г., 2015  
**ISBN 978-985-468-782-7** © Оформление. УО «БелГУТ», 2015

## **СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- АД – асинхронный двигатель
- ВИД – вентильно-индукторный двигатель
- ГПТ – генератор постоянного тока
- ДПТ – двигатель постоянного тока
- ДПР – датчик положения ротора
- ИМ – индукторная машина
- КПД – коэффициент полезного действия
- МДС – магнитодвижущая сила
- МПТ – машина постоянного тока
- ОВ – обмотка возбуждения
- СГ – синхронный генератор
- СД – синхронный двигатель
- СМ – синхронная машина
- ЭДС – электродвижущая сила

## ВВЕДЕНИЕ

Пособие предназначено для учебно-методической поддержки лекционного курса «Электрические машины» и предполагает контроль знаний студентов по всем разделам курса.

Материал пособия позволит сформировать базу теоретических знаний по соответствующим разделам электрических машин, необходимых в инженерной деятельности, подготовит к успешному решению инженерных вопросов на основе знаний качественных и количественных сторон электромагнитных процессов в электрических машинах.

Первый раздел касается машин постоянного тока, которые используют в генераторном и двигательном режимах. Наибольшее применение двигатели постоянного тока получили в качестве тяговых двигателей транспортных средств, привода устройств автоматики, станков и пр.

Во втором разделе рассматриваются синхронные машины, широко применяемые в качестве генераторов и двигателей.

Материал третьего раздела касается вентильно-индукторных двигателей, применение которых в регулируемом электроприводе заметно возросло.

Материал пособия обеспечивает самоконтроль усвоения информации и исправление возможных ошибок, что особенно важно для студентов заочного факультета. Кроме того, программы самоконтроля пособия могут быть использованы при любых средствах контроля знаний студентов по методу выборочного ответа.

Предполагается следующий порядок работы с пособием:

1 Прочтение минимального объема теоретической информации (обычно – двух подразделов) с кратким конспектированием материала.

2 Выполнение заданий самоконтроля, касающихся рассмотренных подразделов теоретических сведений. Номера заданий берутся и записываются из Программы самоконтроля по соответствующему разделу курса (машины постоянного тока, синхронные машины, вентильно-индукторные двигатели).

3 После выбора ответов на все задания рассмотренных подразделов теоретического материала необходимо убедиться в правильности их выбора или обнаружить ошибку. Сам выбор правильных ответов делается по записи но-

мера задания и номера консультации, соответствующего выбранному ответу. Каждое задание имеет максимум пять ответов (пять консультаций).

Например, отвечая на задания 1–7 подраздела 1.1 раздела «Машины постоянного тока», необходимо записать номера заданий и выбрать ответы, которым соответствуют следующие номера консультаций: 1–18, 2–67, 3–92, 4–105, ..., 7–21.

Имея запись всех ответов на семь заданий, можно теперь убедиться в их правильности, для чего необходимо обратиться к разделу «Консультации», помещенному в конце пособия. При неправильном ответе на какое-то задание необходимо обратиться к соответствующей консультации по данному вопросу. После ознакомления с консультацией необходимо вновь прочитать рекомендуемый подраздел теоретического материала, который указан в Программе самоконтроля, и повторить выбор правильного ответа с последующим обращением к разделу «Консультации», который позволяет убедиться в правильности выбранного ответа.

Студентам настоятельно не рекомендуется обращаться к разделу «Консультации», пока самостоятельно не осуществлен выбор ответов на задания самоконтроля. Следует помнить, что ответы на задания самоконтроля не цель работы, а лишь средство убедиться в правильности понимания информационного материала.

Предлагаемое учебно-методическое пособие может быть использовано для рубежного контроля знаний студентов в компьютерной аудитории или путем личного опроса студентов преподавателем. Ряд заданий самоконтроля составлен в форме задач, для решения которых не требуется много времени, так как основное внимание в них уделяется электротехнической стороне решения, а математические операции сведены к минимуму. Решение некоторых задач выполняется без цифрового расчета, что является одним из способов, заставляющих студентов глубже познавать взаимные связи между различными величинами и явлениями и приучающих их к логическому мышлению.

В каждом задании Программы самоконтроля сообщается условие, приводятся, если необходимо, схема или график и дается несколько ответов. В одних заданиях даны правильные ответы, кроме одного неправильного, в других, наоборот, неправильные, кроме одного правильного. В соответствии с этим в одних случаях студент должен определить неправильный, в других заданиях – правильный ответ. Неправильные ответы соответствуют в большинстве случаев типичным ошибкам, допускаемым студентами при ответе на данные задания.

Приведенные задания в Программах самоконтроля, конечно, не исчерпывают всего их возможного многообразия. Вместе с тем, данные задания подобраны так, что освоение содержащегося в них материала необходимо для успешного изучения курса электрических машин.

## 1 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока (МПТ) используются в режиме двигателя и генератора. В качестве источников энергии постоянного тока раньше обычно применялись генераторы постоянного тока (для питания электроприводов с широким диапазоном регулирования частоты вращения, в электролизной промышленности, на судах, тепловозах и т. д.). В настоящее время они используются относительно мало, так как для получения энергии постоянного тока разработаны и широко применяются полупроводниковые преобразователи переменного тока в постоянный.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) используются на электротранспорте (электровозы, троллейбусы, трамваи, электрокары), в качестве привода различных станков, механизмов и т. д. Их применение обусловлено простотой регулирования частоты вращения, большими пусковыми моментами.

В таблице 1.1 приведены характеристики некоторых электрических машин постоянного тока.

Таблица 1.1 – Примеры применения машин постоянного тока

Назначение	Использование	$P$ , кВт	$I$ , А	$U$ , В	Примечание
Двигатели	Трамвай	40–50	75–100	550	Достоинства: 1) широкое регулирование частоты вращения; 2) развивают большой пусковой момент
	Электровоз	755–855	400–600	1500	
	Прокатный стан	11500	11500	1000	
	Атомоход «Пенни»	18000	18000	1000	
Генераторы	Для электролиза	60–120	10000	6–12	Сейчас чаще применяют генераторы переменного тока с выпрямителями
	Тепловоз (старые модификации)	2700	3600	750	

### 1.1 Конструкция и принцип действия машин постоянного тока

Конструкция МПТ. Любая электрическая машина обратима, т. е. может работать генератором или двигателем, поэтому их конструкции не отличаются (рисунок 1.1 [8]).

Конструктивно МПТ состоят из двух частей: неподвижной – статора и подвижной – ротора. Статор представляет собой пустотелый стальной цилиндр, называемый станиной, на внутренней поверхности которого располагаются полюса магнитной системы, создающие магнитный поток электрической машины. В зависимости от способа создания магнитного потока различают МПТ с магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением.

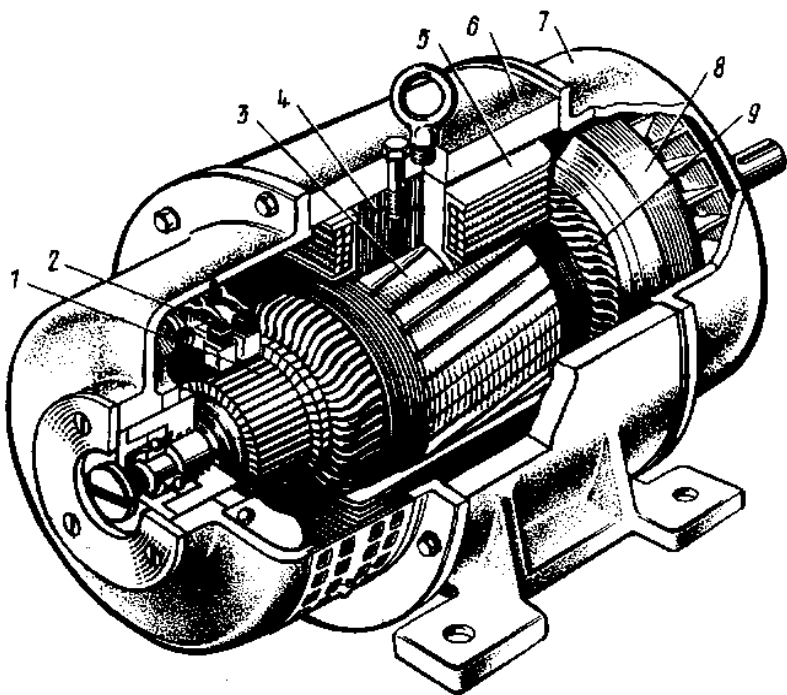


Рисунок 1.1 – Устройство электрической машины постоянного тока:  
 1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – сердечник главного полюса; 5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – станина; 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

При магнитоэлектрическом возбуждении полюса магнитной системы МПТ формируются постоянными магнитами. Такое возбуждение находит применение в машинах малой мощности. В МПТ с электромагнитным возбуждением полюс магнитной системы создается электромагнитом, представляющим собой ферромагнитный сердечник с размещенной на нем обмоткой, по которой протекает постоянный ток. Эта обмотка получила название *обмотки возбуждения*. Полюсы, формирующие основной магнитный поток, называются главными (рисунок 1.2).

Между главными полюсами могут быть установлены дополнительные полюсы, при помощи которых корректируется искажение основного магнитного поля, вызванное

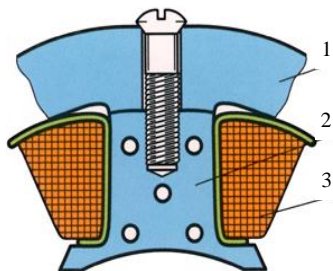


Рисунок 1.2 –  
 Главный полюс:  
 1 – станина; 2 – сердечник;  
 3 – обмотка возбуждения



влиянием нагрузки МПТ. Воздействие корректирующего магнитного поля дополнительных полюсов позволяет уменьшить искрение между щетками и коллектором.

Часть МПТ, создающая магнитный поток, называется *индуктором*.

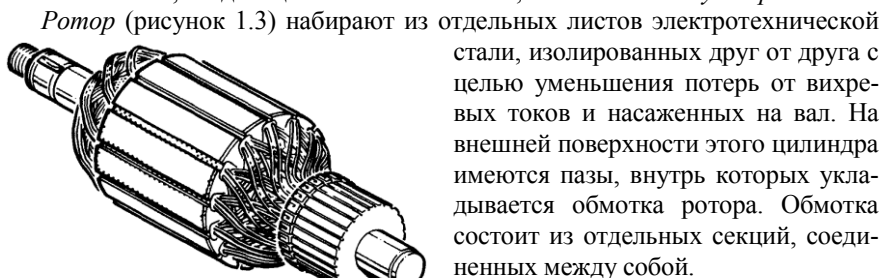


Рисунок 1.3 – Ротор МПТ

*Секция* – элементарная часть роторной обмотки (рисунок 1.4). Она может состоять из одного или нескольких витков. В пазы ротора секция укладывается таким образом, что одна ее часть находится под северным полюсом магнитной системы, а вторая – под южным. Часть секции, лежащая в пазу под полюсом, называется активной стороной секции. Каждая секция содержит две активные стороны, которые объединены лобовыми частями.

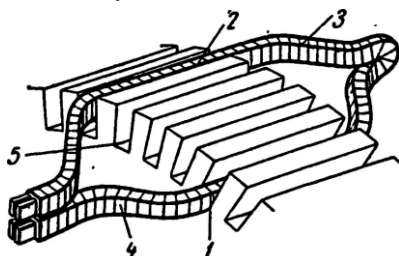


Рисунок 1.4 – Секция обмотки:  
1, 2 – активные стороны витка;  
3, 4 – лобовые части витка;  
5 – пазы сердечника

Точки соединения секций между собой подключаются к коллектору, который закреплен на валу. Коллектор (рисунок 1.5) представляет собой цилиндрическую конструкцию, набранную из пластин кадмированной меди (для увеличения износостойкости). Эти пластины располагаются на изоляционном основании и изолированы друг от друга. Число пластин коллектора зависит от количества точек соединения между собой секций.

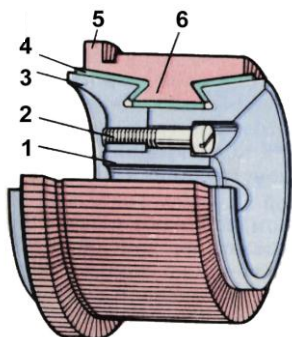


Рисунок 1.5 – Коллектор:  
1, 3 – стальные части втулки;  
2 – стягивающий винт;  
4 – миканитовая прокладка;  
5 – петушок; 6 – коллекторные пластины

К наружной поверхности коллектора прижимаются щетки, закрепленные на станине и изолированные от нее (рисунок 1.6 [12]). С помощью коллектора и щеток осуществляется электрическое соединение вращающейся обмотки ротора с внешней цепью.

В обмотке ротора МПТ, как в двигателе, так и в генераторном режимах, появляется ЭДС, поэтому вращающуюся часть МПТ называют *якорем*.

Таким образом, в конструкции МПТ можно выделить две электрические цепи: возбуждения и якоря. В зависимости от того, как они подключаются между собой, МПТ делят на машины с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рисунок 1.7). В МПТ с независимым возбуждением электрические цепи обмотки возбуждения и якоря не связаны между собой. Если цепь обмотки возбуждения подключена параллельно цепи якоря, то в этом случае электрическая машина называется с параллельным возбуждением. При последовательном возбуждении обмотка якоря и обмотка возбуждения соединены последовательно. Машины со смешанным возбуждением имеют две обмотки, одна из которых параллельна якорной цепи, а другая соединена последовательно с цепью якоря.

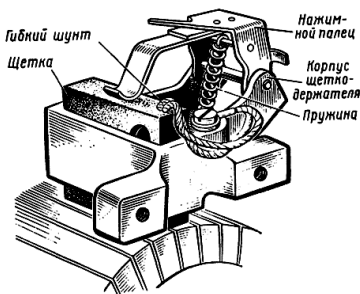


Рисунок 1.6 – Пример конструкции щеточного узла

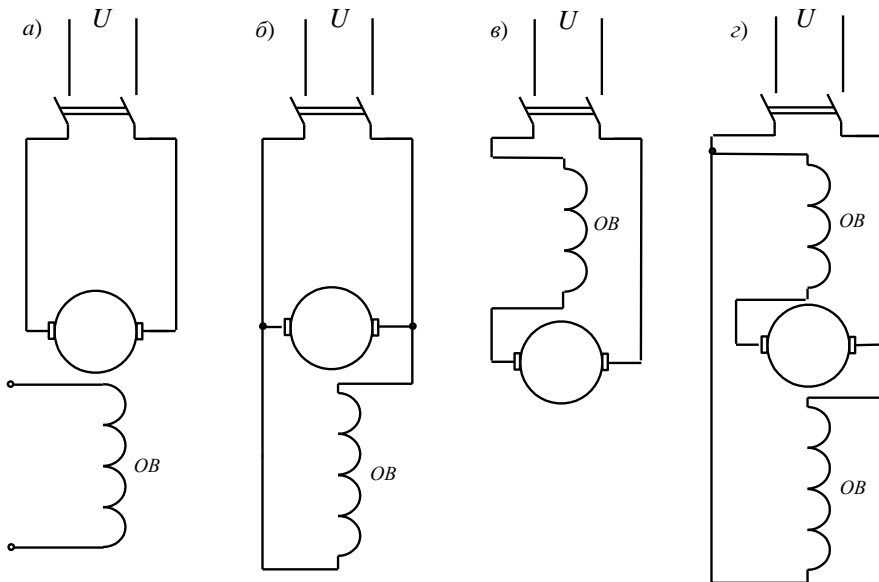


Рисунок 1.7 – Схемы МПТ независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения

Для подключения обмоток якоря и возбуждения используется клеммный щиток, выводы которого маркируются, как правило, следующим образом:

Я1, Я2 – обмоток якоря (A1, A2 по ГОСТ 26772-85);

K1, K2 – компенсационной обмотки (C1, C2);

D1, D2 – обмоток дополнительных полюсов (B1, B2);

C1, C2 – последовательной обмотки возбуждения (серийной) (D1, D2);

Ш1, Ш2 – параллельной обмотки возбуждения (шунтовой) (E1, E2).

Принцип действия генератора постоянного тока. В генераторах постоянного тока (ГПТ) происходит преобразование механической энергии в электрическую, снимаемую со щеток МПТ. Работа генератора основана на явлении электромагнитной индукции.

Для пояснения принципа действия ГПТ воспользуемся рисунком 1.8 [13]. На этом рисунке основное магнитное поле создается полюсами *N* и *S* индуктора. Сердечники полюсов, якоря и станины являются частью магнитной цепи машины, через которые проходит основной магнитный поток, пересекая проводники якорной обмотки.

Представленная на рисунке 1.8 секция якорной обмотки состоит из одного витка. Концы секции подключены к простейшему коллектору, состоящему из двух полуколец, изолированных между собой. Щетки *A* и *B* прижимаются к полукольцам (пластинам коллектора), и к ним подключается электрическая нагрузка *R*.

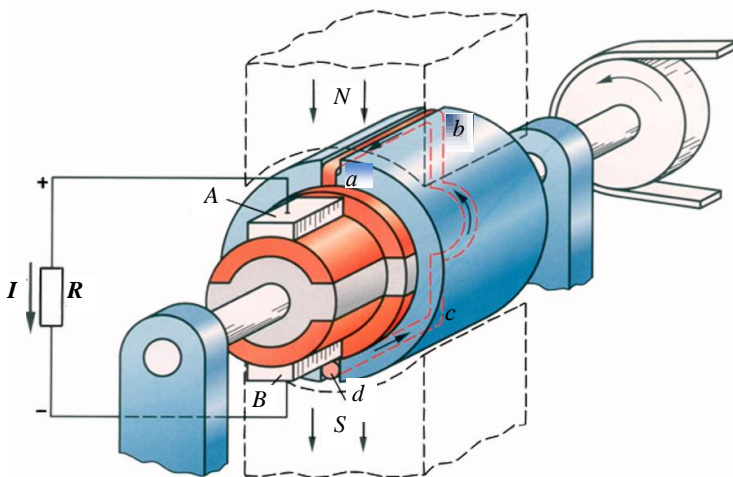


Рисунок 1.8 – Упрощенная модель ГПТ

При вращении якоря, в каждой из активных сторон витка индуцируется ЭДС, мгновенное значение которой

$$e_b = Blv \sin \alpha, \quad (1.1)$$

где  $B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре между полюсом и якорем;  $l$  – активная длина двух сторон витка ( $ab$  и  $cd$ );  $v$  – линейная скорость движения проводника;  $\alpha$  – угол поворота витка относительно геометрической нейтральной (воображаемая линия, проходящая посередине между полюсами).

Из графика, приведенного на рисунке 1.9, следует, что ЭДС одного витка  $e_B$ , снимаемая со щеток, имеет неизменную полярность, но пульсирует от максимального значения до нуля.

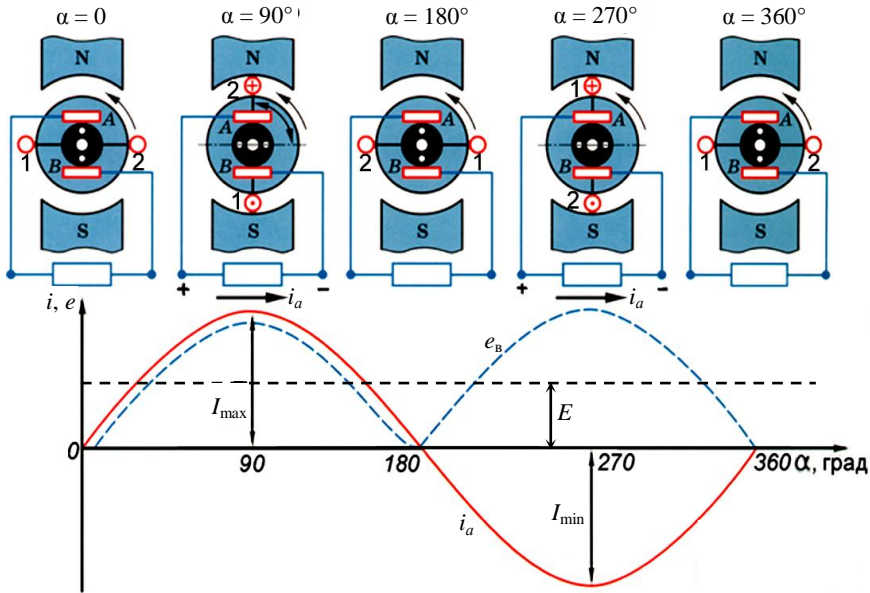


Рисунок 1.9 – Пример выпрямления тока коллектором

Для получения во внешней цепи ЭДС, близкой к постоянной, необходимо увеличить количество секций в обмотке якоря, равномерно распределив их по поверхности сердечника ротора, и соответственно увеличить число коллекторных пластин. В этом случае суммируются ЭДС всех проводников, включенных последовательно в ветви обмотки, заключенной между щетками.

Таким образом ЭДС реальной МПТ, снимаемая со щеток

$$E = e_1 + e_2 + \dots + e_{\frac{N}{2a}} = \left( B_1 + B_2 + \dots + B_{\frac{N}{2a}} \right) lv = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i lv,$$

где  $e_1, e_2, \dots, e_{\frac{N}{2a}}$  – ЭДС проводников обмотки якоря;

$B_1, B_2, \dots, B_{\frac{N}{2a}}$  – магнитная индукция, пронизывающая проводники;

$N$  – количество проводников в обмотке;

$2a$  – число параллельных ветвей.

При достаточно большом количестве секций в обмотке можно считать

$$\sum_{i=1}^N B_i = B_{\text{cp}} \frac{N}{2a} = \text{const},$$

где  $B_{\text{cp}}$  – среднее значение магнитной индукции под полюсом.

Согласно второму закону Кирхгофа, напряжение  $U$  на зажимах якоря ГПТ будет меньше ЭДС  $E$  на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря

$$U = E - I_a r_a. \quad (1.2)$$

Проводники обмотки якоря находятся в магнитном поле, поэтому на них действуют электромагнитные силы, направление которых определяется по правилу левой руки. Эти силы создают механический момент, который в режиме генератора является тормозящим, а в двигательном – движущим.

Принцип действия двигателя постоянного тока. В двигателях постоянного тока (ДПТ) происходит преобразование электрической энергии в механическую. При подключении к внешнему источнику напряжения в обмотке якоря начнет протекать постоянный ток  $I_a$ . При этом на проводники с током обмотки якоря в магнитном поле будут действовать электромагнитные силы и возникнет вращающий момент. Направление действия электромагнитной силы при переходе активной стороны секции от одного полюса к другому не изменяется, так как коллектор меняет направление тока в обмотке якоря.

Направление ЭДС в двигателе *не совпадает* с направлением тока якоря  $I_a$  и напряжения  $U$ , поэтому она называется *противоэлектродвижущей* силой.

Приложенное к якорю двигателя напряжение  $U$  уравнивается противоЭДС  $E$  и падением напряжения в обмотке якоря  $I_a r_a$ :

$$U = E + I_a r_a. \quad (1.3)$$

Таким образом, в генераторном режиме  $U < E$ , а в двигательном –  $U > E$ .

Каждая электрическая машина характеризуется номинальными данными, которые указываются на ее заводском щитке. К основным номинальным данным машин постоянного тока относятся:

а) номинальная мощность  $P_n$  генератора – это мощность на его зажимах, которую он может отдать потребителям; под  $P_n$  двигателя понимают полезную механическую мощность, которую он развивает (мощность на валу);

б) номинальное напряжение  $U_n$  – это напряжение, для работы на котором предназначена электрическая машина;

в) номинальная сила тока  $I_n$ , которая определяется номинальными значениями мощности и напряжения;

г) номинальная частота вращения  $n_n$  – это частота вращения якоря (ротора), развиваемая в номинальном режиме.

## 1.2 Обмотки якоря и их ЭДС

Полусным делением  $\tau$  называют часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс или, как показано на рисунке 1.10, между соседними разноименными полюсами.

Обмотка якоря представляет собой замкнутую систему, в которой секции соединены последовательно, для чего к каждой коллекторной пластине припаивают конец одной секции и начало другой, следующей за ней по схеме обмотки.

Число пар полюсов в машине принято обозначать буквой  $p$ , тогда число полюсов равно  $2p$ . Если величину полюсного деления умножить на число полюсов, то их произведение дает длину окружности якоря, т.е.  $2p\tau = \pi D$ , где  $D$  – диаметр якоря.

При одной паре полюсов геометрическая нейтраль перпендикулярна оси полюсов. При большем числе пар полюсов количество нейтральных линий равно числу пар полюсов. На нейтрали магнитная индукция  $B$  при отсутствии нагрузки равна нулю.

В обмотках якоря различают следующие шаги по якорю (рисунок 1.11):

- первый частичный  $y_1$  – расстояние между начальной и конечной сторонами секции, т. е. ширина секции;
- второй частичный  $y_2$  – расстояние между конечной стороной одной секции и начальной стороной другой, следующей за ней по схеме обмотки;
- результирующий  $y$  – расстояние между начальными сторонами двух соседних секций;
- шаг обмотки по коллектору  $y_k$  – расстояние между коллекторными пластинами, к которым подключены начало и конец секции.

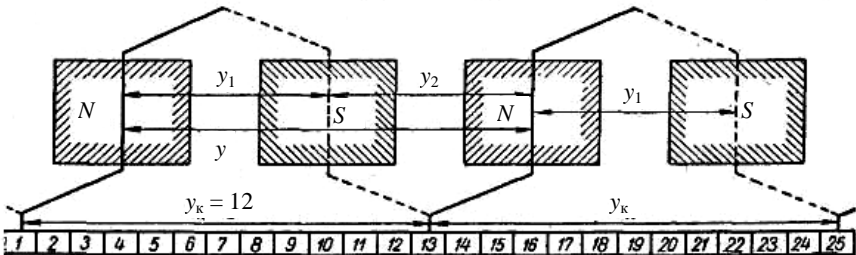


Рисунок 1.11 – Шаги волновой обмотки

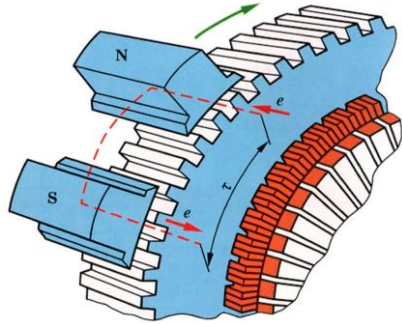


Рисунок 1.10 – Полюсное деление

Шаги обмотки по магнитопроводу ротора измеряют числом пропущенных промежутков между пазами, а шаг по коллектору – числом изоляционных промежутков между коллекторными пластинами.

В современных машинах ширину секции делают меньше величины полюсного деления, что позволяет экономить медь в лобовых соединениях и улучшить условия коммутации. Такую секцию называют **секцией с укороченным шагом** (рисунок 1.12).

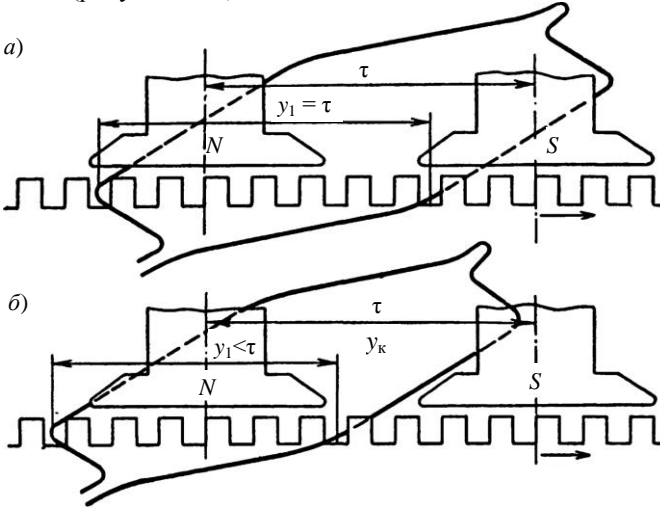


Рисунок 1.12 – Секции различной ширины:  
 а – с полным шагом; б – с укороченным шагом

**1.2.1 Простая петлевая обмотка**

Петлевой обмотке называют потому, что ее секции имеют форму петли (рисунок 1.13). В простой петлевой обмотке начало и конец секции присоединены к рядом расположенным коллекторным пластинам.

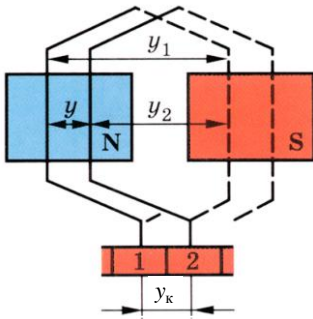


Рисунок 1.13 – Петлевая обмотка

Обмотку якоря машин постоянного тока делают двухслойными. В каждом пазу такой обмотки располагаются две активные стороны двух различных секций: начальная сторона одной секции вверху паза и конечная сторона другой – внизу паза.

При расчетах многослойных обмоток применяют понятие *элементарного паза*, под которым понимают паз с двумя активными сторонами. В многослойной обмотке в одном реальном пазу может быть несколько элементарных пазов.

Так как в секции есть две активные стороны, то каждой секции соответствует один элементарный паз, и на каждую секцию приходится одна коллекторная пластина, поскольку к каждой пластине присоединяют начало одной секции и конец другой. Поэтому для любой многослойной обмотки

$$S = K = Z_{эл},$$

где  $S$  – число секций в обмотке якоря;

$K$  – число коллекторных пластин;

$Z_{эл}$  – число элементарных пазов.

Расчетные формулы для простой двухслойной петлевой обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p} \pm b; \quad y = y_k = 1; \quad y = y_1 - y_2,$$

где  $b$  – число, которое отнимают или добавляют, чтобы при делении  $y_1$  было целым числом.

*Параллельной ветвью* обмотки называют часть обмотки, находящуюся между двумя разноименными щетками. В одну ветвь входят секции, начальные стороны которых находятся под северным полюсом, а другую – под южным (рисунок 1.14).

Следовательно, в простой петлевой обмотке столько параллельных ветвей, сколько полюсов, т. е.  $2a = 2p$ , где  $a$  – число пар параллельных ветвей. ЭДС секций в параллельной ветви складываются.

Между щетками в разные моменты времени находятся различные секции, т. к. обмотка с коллектором при вращении непрерывно перемещается относительно щеток. Секции переходят из одной параллельной ветви в другую, но сумма ЭДС секций в параллельной ветви не меняется по величине и, следовательно, на щетках ЭДС неизменна.

Для большей наглядности обмотку якоря представляют в виде электрической цепи (см. рисунок 1.16), которая выполняется на основании развернутой схемы. Для изображения электрической схемы берут щетки и имеющие с ними контакт коллекторные пластины. Затем начинают обход секций обмоток и изображают их в виде отдельных витков.

Если параллельные ветви обмотки обладают одинаковыми электрическими сопротивлениями, и в них индуктируются одинаковые по величине ЭДС, то такая обмотка называется *симметричной*.

Схема-развертка якорной обмотки представляет собой вид на якорь сверху (полюса находятся над якорем) после разрезания цилиндрической

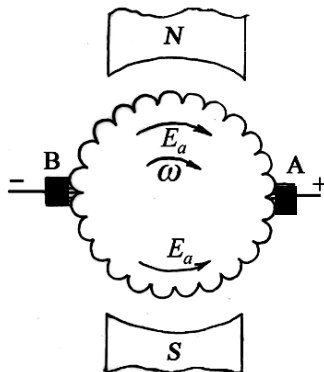


Рисунок 1.14 – Пример параллельной ветви



поверхности якоря по образующей и развертывания ее на плоскость.

Рекомендуется схему-развертку выполнять в следующем порядке:

1 На листе миллиметровой или клетчатой бумаги изображают  $Z_{эл}$  элементарных пазов в виде отрезков вертикальных линий – сплошного (слева), который изображает верхнюю сторону, и пунктирного (справа), изображающего нижнюю активную сторону.

2 Нумеруют элементарные пазы по порядку, начиная с первого и заканчивая последним ( $Z_{эл}$ ). Эта нумерация является основной нумерацией всех элементов обмотки: номер паза является номером секции, начало которой лежит в верхнем слое паза, и коллекторной пластине, с которой соединено начало секции. Так как в каждом пазу лежат две активные стороны, то верхнюю сторону обозначают номером паза без штриха, а нижнюю – номером паза со штрихом.

3 Производят разметку положения и нумерацию коллекторных пластин. Для этого посередине между элементарными пазы  $N_1 = 1$  и  $N_n = 1 + y_1$  (см. рисунок 1.15) проводят вертикальную линию  $ab$ , на которой находится вершина верхней лобовой части секции № 1.

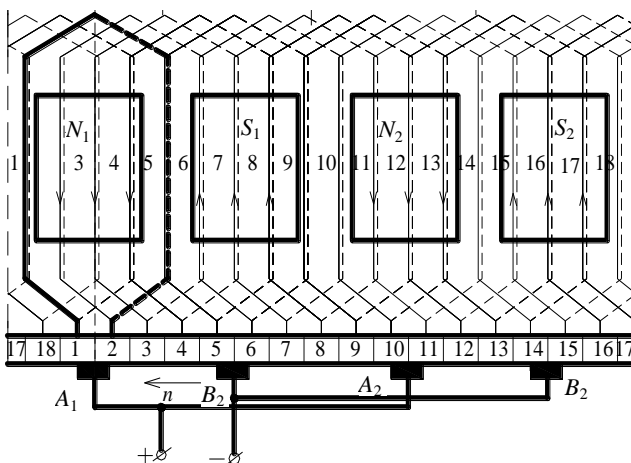


Рисунок 1.15 – Схема-развертка простой петлевой обмотки при  $Z_{эл} = S = K = 18$ ;  $p = 2$ ;  $y_1 = 4$ ;  $y_k = 1$

В случае простой петлевой обмотки (см. рисунок 1.15) на этой же линии  $ab$  находится граница (изоляционный промежуток) между коллекторными пластинами 1 и 2. Найдя положение пластин 1 и 2, размечают остальные пластины, приняв их ширину  $t_k$  равной расстоянию между элементарными пазы.

Наносят на схему-развертку контуры главных полюсов. Щетки должны

быть расположены напротив середины полюсов на расстоянии  $K/2p$  коллекторных делений друг от друга. Задавшись направлением вращения (рекомендуется взять против вращения часовой стрелки) и полярностью главных полюсов, определяют полярность щеток (с учетом режима работы машины – генераторный или двигательный). Все щетки одинаковой полярности соединяются друг с другом.

Для определения полярности щеток необходимо выявить направление ЭДС в какой-либо секции и перенести это направление на схему параллельных ветвей (рисунок 1.16). Схема параллельных ветвей представляет собой электрическую схему соединения секций, которые изображаются в виде полуокружностей. Схема показывается для того момента времени, для которого выполнена схема-развертка. Щетки образуют  $2a$  параллельных ветвей и замыкают накоротко секции, проходящие коммутацию (одновременно соединенные щетками).

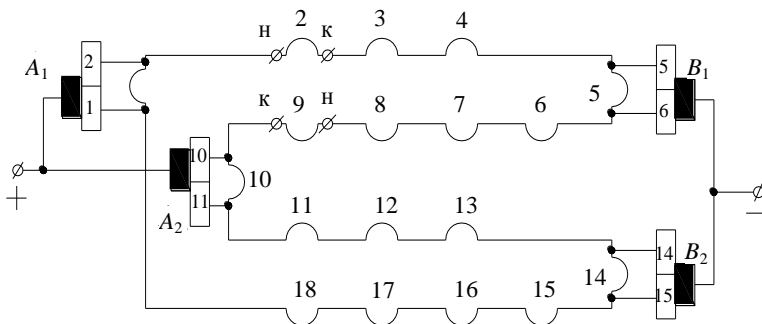


Рисунок 1.16 – Схема параллельных ветвей простой петлевой обмотки, изображенной на рисунке 1.15

Выполнение петлевой обмотки рассмотрим на примере 1.1.

**Пример 1.1.** Рассчитать и вычертить простую двухслойную петлевую обмотку, если известно, что  $2p = 4$ ;  $Z_{эл} = 12$ .

*Решение.* Для простой петлевой двухслойной обмотки

$$y = y_k = 1; \quad Z_{эл} = K = S = 12; \quad y_1 = Z_{эл} / (2p) \pm b = 12 / 4 \pm 0 = 3.$$

Производим нумерацию пазов, произвольно выбрав первый. При определении номера паза, в который нужно укладывать конец первой секции, прибавляем  $y_1$ :  $1 + 3 = 4$ . По приведенной выше методике размечаем положения коллекторных пластин. Начинаем выполнять обмотку с первой коллекторной пластины, затем укладываем ее в паз 1 (рисунок 1.17, а). Конец секции укладываем в паз 4 и присоединяем ее ко второй коллекторной пластине, так как  $y_k = 1$ , т. е. между началом и концом секции по коллектору находится один изоляционный промежуток.

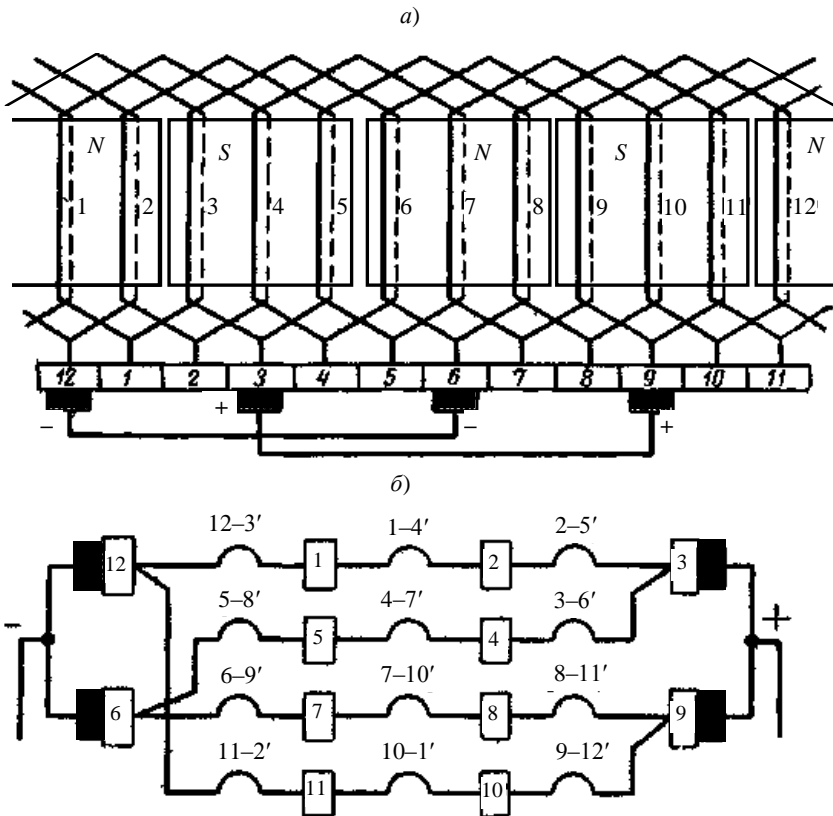


Рисунок 1.17 – Простая петлевая двухслойная обмотка:  
*a* – развертка обмотки; *б* – схема параллельных ветвей

Вторую секцию начинаем со второй коллекторной пластины. Для определения номера паза, в который нужно уложить второй секции, к номеру паза, в котором лежит начало первой секции, прибавляем  $y$ :  $1 + 1 = 2$ . Начало второй секции находится в пазу 2. В дальнейшем обмотка рассчитывается по тому же принципу. Для облегчения выполнения обмотки составляем обмоточную таблицу (таблица 1.2). Номера сторон секций, лежащих внизу паза, снабдим в обмоточной таблице штрихом.

Принцип составления обмоточной таблицы заключается в следующем. В первой графе по вертикали к каждой цифре прибавляем  $y_k$ , по второй по вертикали  $-y$ , а по горизонтали  $-y_1$  в третьей по вертикали  $-y_k$ .

Таблица 1.2 – Обмоточная таблица

Номер коллекторной пластины, к которой припаяно начало секции	Номера пазов, в которых лежит секция	Номер коллекторной пластины, к которой припаян конец секции
1	1-4'	2
2	2-5'	3
3	3-6'	4
4	4-7'	5
5	5-8'	6
6	6-9'	7
7	7-10'	8
$y_k$	8-11'	9
9	9-12'	10
10	10-1'	11
11	11-2'	12
12	12-3'	1

Составим схему параллельных ветвей простой петлевой двухслойной обмотки (рисунок 1.17, б). Если начать вычерчивать параллельную ветвь с положительной щетки, то закончится она на отрицательной. Начертим параллельную ветвь, начиная с коллекторной пластины 3, на которой расположена щетка. Обходя обмотку по часовой стрелке, наносим на схему секцию 3-6', которая заканчивается на коллекторной пластине 4. Далее вычерчиваем секцию 4-7', выходящую из коллекторной пластины 4. Секция 4-7' заканчивается на коллекторной пластине 4. После этого следует секция 5-8', конец ее присоединен к коллекторной пластине 6, на которой стоит отрицательная щетка. Далее, обходя обмотку по часовой стрелке, составляем схему параллельных ветвей, которых в данной обмотке четыре.

### 1.2.2 Простая волновая обмотка

Волновой обмотку называют потому, что по форме секция обмотки напоминает волну. Шаги простой волновой обмотки представлены на рисунке 1.18.

Расчетные формулы для простой двухслойной волновой обмотки:

$$y = y_1 + y_2; \quad y_k = \frac{K \pm 1}{p}; \quad 2a = 2; \quad y_1 = \frac{Z_{эл} \pm b}{2p}.$$

Число параллельных ветвей  $2a$  простой волновой обмотки независимо от числа полюсов машины всегда равно двум.

Пример выполнения простой двухслойной волновой обмотки для  $Z_{эл} = S = K = 19; p = 2; y_1 = 4; y_k = 9$  приведен на рисунках 1.19 и 1.20.

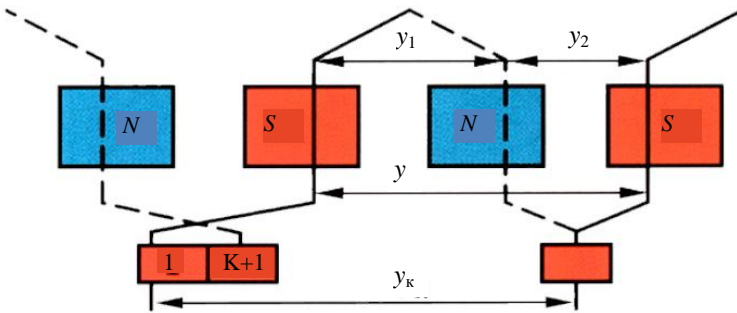


Рисунок 1.18 – Волновая обмотка

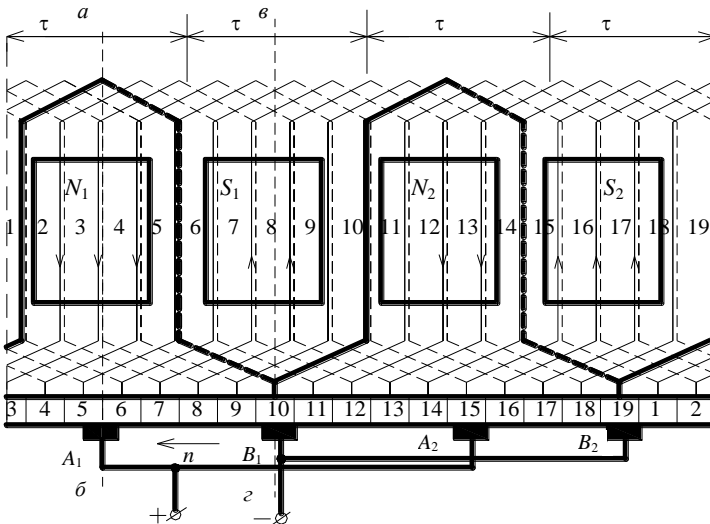


Рисунок 1.19 – Схема-развертка простой волновой обмотки при  $Z_{\text{эл}} = S = K = 19$ ;  $p = 2$ ;  $y_1 = 4$ ;  $y_K = 9$

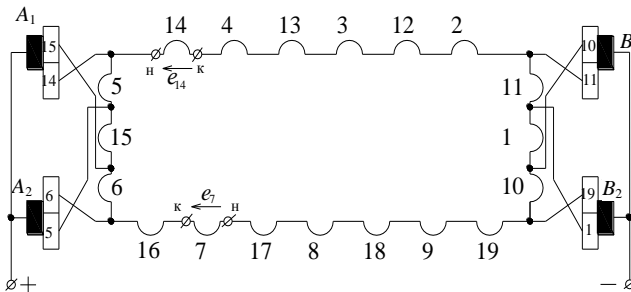


Рисунок 1.20 – Схема параллельных ветвей простой волновой обмотки, соответствующая рисунку 1.19

Для разметки положения и нумерации коллекторных пластин посередине между элементарными пазами  $N_1 = 1$  и  $N_n = 1 + y_1$  (см. рисунок 1.19) проводят вертикальную линию  $ab$ , на которой находится вершина верхней лобовой части секции № 1. В случае простой волновой обмотки для разметки пластин коллектора необходимо найти элементарный паз  $N_n$ , в котором лежит начало следующей за первой секции ( $N_n = N_1 + y_k = 1 + y_k$ ).

Посередине между пазами  $(1 + y_1)$  и  $(1 + y_k)$  (см. рисунок 1.19) проводят линию  $вг$ , которая делит коллекторную пластину с номером  $N_n$  пополам. Найдя положение коллекторной пластины  $N_n$ , размечают остальные пластины в порядке дальнейшей последовательности цифр.

**Пример 1.2.** Рассчитать и вычертить простую двухслойную волновую обмотку, составить обмоточную таблицу, если известно, что  $2p = 4$ ;  $Z_{эл} = K = S = 9$ .

*Решение.*  $y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{9 - 1}{2} = 4$ ;  $y_1 = \frac{Z_{эл} \pm b}{2p} = \frac{9}{4} - \frac{1}{4} = 2$ ;  $y_2 = y - y_1 = 4 - 2 = 2$ .

Обмотку выполняем аналогично петлевой, но с шагом по коллектору  $y_k = 4$  (например, если начало первой секции присоединить к коллекторной пластине 1, то конец этой секции присоединяем к коллекторной пластине 5; начала секций располагаем также на расстоянии  $y = 4$ ). Развернутая схема обмотки приведена на рисунке 1.21. Для облегчения выполнения обмотки составляем обмоточную таблицу (таблица 1.3).

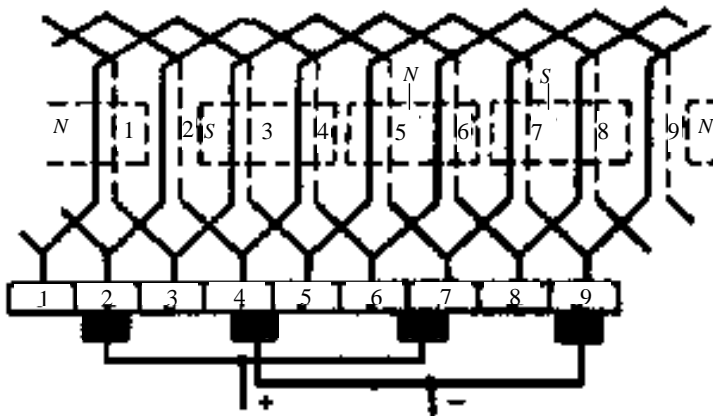


Рисунок 1.21 – Развертка простой волновой двухслойной обмотки

При данном положении якоря в схеме обмотки секции 2–4', 7–9' и 9–2' замкнуты накоротко проводниками, соединяющими щетки одноименной полярности.

Число щеток к обмотке должно быть не меньше одной на каждую параллельную ветвь. Поэтому в данном случае можно было бы ограничиться и двумя щетками, но

принято ставить столько щеток в машине, сколько в ней полюсов, что сопровождается снижением тока, приходящегося на одну щетку, уменьшением размеров коллектора и позволяет достигнуть большей симметрии обмоток.

Таблица 1.3 – Обмоточная таблица

Номер коллекторной пластины, к которой припаяно начало секции	Номера пазов, в которых лежит секция	Номер коллекторной пластины, к которой припаян конец секции
↓ 1 5 9 4 8 $U_k$ 3 7 2 6	→ 1-3' 5-7' 9-2' 4-6' 8-1' у 3-5' 7-9' 2-4' 6-8'	↓ 5 9 4 8 3 $U_k$ 7 2 6 1

Волновую последовательную обмотку применяют в электрических машинах больших напряжений, а петлевую параллельную – в машинах больших токов.

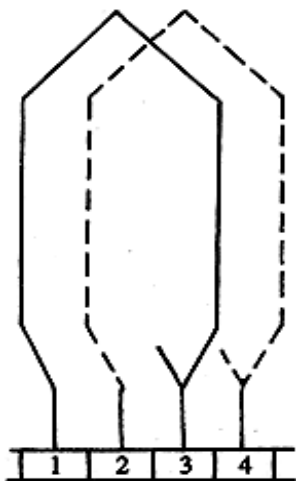


Рисунок 1.22 –  
Образование сложной  
петлевой обмотки

Для получения значительных токов применяют сложную петлевую обмотку (рисунок 1.22). В простой петлевой обмотке увеличить с этой целью число параллельных ветвей трудно, так как для этого нужно большее число полюсов, что ведет к увеличению размеров и вибрации машины.

Сложная петлевая обмотка состоит обычно из двух или нескольких *простых* петлевых обмоток, число которых обозначают буквой  $m$  (коэффициент кратности). Эти петлевые обмотки независимы друг от друга и соединяются между собой только щетками. Как видно из рисунка 1.22, секция 1 первой петлевой обмотки присоединена к коллекторным пластинам 1 и 3, а секция 2 второй петлевой обмотки – к коллекторным пластинам 2 и 4.

### 1.2.3 Магнитный поток, ЭДС и электромагнитный момент

На рисунке 1.23 показано примерное распределение магнитного поля в воздушном зазоре под главным полюсом и кривая распределения магнитной индукции в зазоре машины постоянного тока при холостом ходе. Магнитный поток  $\Phi$  в зазоре можно определить как

$$\Phi = B_{\text{cp}} l \tau,$$

где  $B_{\text{cp}}$  – средняя индукция в пределах полюсного деления;

$l$  – длина полюса по оси;

$\tau$  – полюсное деление.

За время оборота якоря потокоцепление  $\Psi$  одного витка при  $p$  пар полюсов изменяется на величину  $\Delta\Psi = 2 \Phi 2 p$ ; время одного оборота якоря  $\Delta t = 60/n$ . Следовательно, в каждом витке секции индуцируется ЭДС  $e_b = \Delta\Psi/\Delta t = 4\Phi p n/60$ .

Если число проводов на поверхности якоря равно  $N$ , число витков секций  $N/2$  и число параллельных ветвей обмотки  $2a$ , ЭДС машины постоянного тока  $E$  определяется как

$$E = \frac{4\Phi p n}{60} \frac{N}{2} \frac{1}{2a} = \frac{p}{60} \frac{N}{a} n \Phi = c_E n \Phi, \quad (1.4)$$

где  $c_E = pN/(60a)$ .

Таким образом, можно определить ЭДС как результат пересечения линий магнитного поля  $N$  проводами якоря, вращающегося с частотой  $n$ .

Определим электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$ , действующий на провода, а следовательно, и на якорь. Электромагнитная сила равна произведению числа проводов  $N$  на среднюю магнитную индукцию  $B_{\text{cp}}$ , активную длину проводов  $l$  и ток в ветви обмотки  $i_a = I_a/(2a)$ . Диаметр якоря выразим через полюсное деление  $D = 2p\tau/\pi$ . Тогда электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}} = B_{\text{cp}} l \frac{I_a}{2a} \frac{p\tau}{\pi} = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} I_a \Phi, \quad (1.5)$$

где  $\Phi = B_{\text{cp}} l \tau$

Обозначив неизменную для данной машины величину  $c_M = pN/(2\pi a)$ , получим сокращенные выражения для  $E$  и  $M_{\text{эм}}$ , которыми часто пользуются на практике:

$$E = c_E n \Phi \quad \text{и} \quad M_{\text{эм}} = c_M I_a \Phi. \quad (1.6)$$

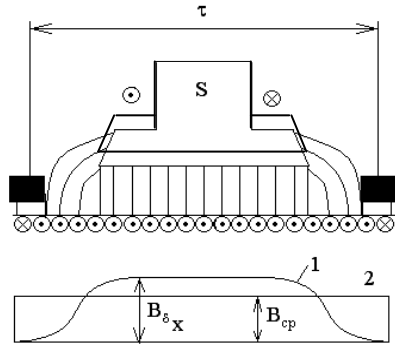


Рисунок 1.23 – Распределение магнитного поля в зазоре под полюсом



**Пример 1.3.** Определить ЭДС машины постоянного тока, если число проводов обмотки якоря  $N = 360$ , число пар полюсов  $p = 2$ , число пар параллельных ветвей обмотки якоря  $a = 2$ , частота вращения якоря  $n = 2000$  об/мин, магнитный поток полюсов  $\Phi = 0,01$  Вб.

*Решение.* Значение ЭДС определяем по формуле (1.4):

$$E = \frac{p}{60} \frac{N}{a} n \Phi = \frac{2}{60} \frac{360}{2} \cdot 2000 \cdot 0,01 = 120 \text{ В.}$$

### 1.3 Реакция якоря. Коммутация

#### 1.3.1 Магнитное поле обмотки якоря

Для холостого хода распределение магнитного поля в зазоре, создаваемое основными полюсами, представлено на рисунке 1.24, *а*. Вокруг проводников якоря с током создается магнитный поток  $\Phi_a$ , направление которого определяется по правилу правоходного буравчика (рисунок 1.24, *б*). Поля якоря и индуктора, действующие совместно, образуют результирующее поле. Воздействие поля якоря на поле индуктора называется *реакцией якоря* (рисунок 1.24, *в*).

По величине результирующий магнитный поток  $\Phi_{рез}$  становится меньше магнитного потока индуктора  $\Phi$  из-за того, что вследствие насыщения магнитной цепи увеличение потока под краем полюса будет происходить меньше, а ослабление – больше.

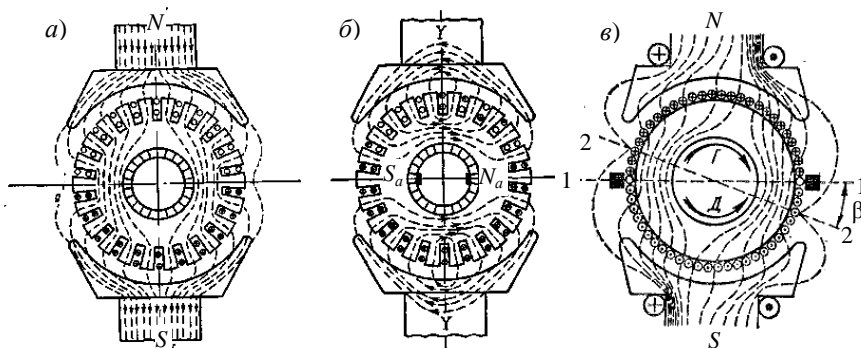


Рисунок 1.24 – Магнитное поле:

*а* – полюсов, *б* – якоря, *в* – результирующее при нагрузке

Линия, проходящая через точки, на которых индукция результирующего магнитного поля равна нулю, называется *физической нейтралью* (линия 1–2 на рисунке 1.24, *в*). Таким образом, реакция якоря при нагрузке искажает магнитный поток, уменьшает его значение и сдвигает физическую нейтраль с геометрической нейтральной (при холостом ходе геометрическая и физическая нейтральные совпадают). В генераторе физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря; в двигателе – против направления вращения.

Поэтому результирующее магнитное поле в генераторном режиме ослабевает под набегающей частью полюса, а в двигателе – под сбегающей.

### 1.3.2 Коммутация. Способы улучшения коммутации

Работа машины происходит при непрерывном переключении секций обмотки из одной ветви с током  $I_a/(2a)$  в другую с таким же по величине током противоположного направления.

Под коммутацией в МПТ подразумевают процессы, протекающие при переходе секций якорной обмотки из одной параллельной ветви в другую. На этот процесс влияют электромагнитные, механические, термические и электрохимические факторы. При неудовлетворительной коммутации между щетками и коллекторными пластинами возникает искрение, которое вызывает разрушение щеток и коллекторных пластин. Искрение может быть интенсивным, а в наиболее тяжелых режимах создать “круговой огонь”. В таком режиме между отдельными пластинами коллектора возникают электрические дуги, выводящие коллектор из работоспособного состояния.

При переходе секции из одной параллельной ветви в другую в ней происходит изменение направления тока. Промежуток времени, в течение которого направление тока в секции изменяется на противоположное называется периодом коммутации  $T_k$  (рисунок 1.25).

Изменение тока секции на интервале коммутации вызывает появление в ней ЭДС самоиндукции

$$e_s = L_s di/dt,$$

где  $L_s$  – индуктивность секции, поддерживающая то направление тока, которое было до коммутации, т. е. до замыкания секции щеткой.

Если в процессе коммутации щетка замыкает несколько коллекторных пластин, то изменение тока происходит в нескольких секциях. Так как секции имеют магнитную связь, то в коммутируемых секциях создается ЭДС взаимной индукции  $e_m$ .

Кроме того, коммутируемая секция может пересекаться магнитными силовыми линиями результирующего магнитного поля МПТ, которые наводят в секции ЭДС вращения. Таким образом, закон изменения тока коммутируемых секций формируется под воздействием ЭДС  $e_s$ ,  $e_m$  и  $e_{вр}$ .

ЭДС самоиндукции и взаимной индукции называют *реактивной ЭДС*, а вращения – *коммутационной ЭДС*.

Если суммарное значение ЭДС секции  $e = e_s + e_m + e_{вр}$  равно нулю, то имеет место линейный закон изменения тока в секции (см. рисунок 1.25).

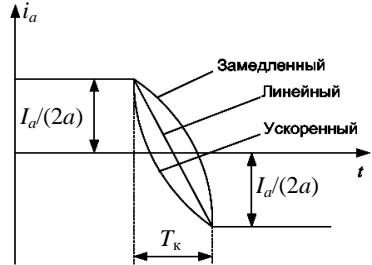


Рисунок 1.25 – Различный характер изменения тока в коммутируемой секции

При  $e_s + e_m + e_{вр} > 0$  на начальном этапе ток изменяется медленнее, чем при прямолинейной коммутации, поэтому такая коммутация называется замедленной, а при  $e_s + e_m + e_{вр} < 0$  – ускоренной.

В связи с тем, что скорость изменения тока влияет на значения  $e_s$  и  $e_m$ , то при замедленной коммутации значение ЭДС в конце периода коммутации будет больше, чем в начале. Это может привести к искрению под сбегаящим краем щеток. При ускоренной коммутации искрение может наблюдаться под набегающим краем щетки. В связи с вышеизложенным, наиболее приемлемым видом коммутации является прямолинейная.

*Способы уменьшения искрения щеток.* Суть разных способов сводится к тому, чтобы суммарную ЭДС коммутируемой секции сделать равной нулю.

Для создания хороших условий коммутации необходимо прежде всего обеспечить надлежащее состояние коллекторно-щеточного узла, чтобы устранить механические причины искрения. Ниже рассматриваются способы обеспечения необходимых электромагнитных условий коммутации. Эти способы направлены на уменьшение добавочного тока коммутации и сводятся к следующим мероприятиям:

- 1) созданию коммутирующей ЭДС с помощью дополнительных полюсов или сдвига щеток с геометрической нейтрали;
- 2) уменьшению реактивной ЭДС;
- 3) увеличению сопротивления цепи коммутируемой секции.

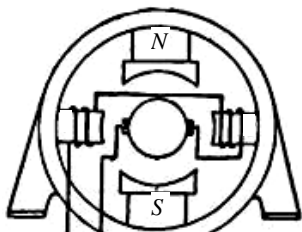


Рисунок 1.26 –  
Схема включения  
дополнительных полюсов

*Дополнительные полюсы.* Основным способом улучшения коммутации в современных МПТ является создание корректирующего магнитного поля с помощью дополнительных полюсов (рисунок 1.26) для  $P_n > 0,3$  кВт.

Намагничивающая сила дополнительных полюсов направлена против намагничивающей силы якоря, вследствие чего компенсируется магнитное поле якоря в зоне коммутации, а так как обе они пропорциональны току нагрузки, то получается автоматическая компенсация магнитного поля якоря при любой нагрузке. Число витков обмотки дополнительных полюсов рассчитывают так, чтобы магнитный поток, создаваемый ими, был на 15–30 % больше магнитного потока якоря. Магнитный поток дополнительных полюсов создает в короткозамкнутой секции коммутирующую ЭДС, равную по величине и противоположную по направлению реактивной ЭДС.

Можно сформулировать правило: за главным полюсом данной полярности по направлению вращения якоря в режиме генератора должен следовать дополнительный полюс противоположной полярности, а в режиме двигателя – той же полярности.

*Улучшение коммутации путем сдвига щеток* применяют в машинах малой мощности без дополнительных полюсов. Коммутирующее поле при этом можно создать путем сдвига щеток с геометрической нейтрали, благодаря чему в зоне коммутации начинает действовать поле главных полюсов. Чтобы индуктируемая этим полем в коммутируемой секции ЭДС  $e_{вр}$  имела правильное направление, поле главных полюсов в зоне коммутации должно быть направлено против поля реакции якоря. Для этого в генераторе щетки необходимо повернуть в сторону вращения, а в двигателе – наоборот. Установку щеток иногда производят “на глаз”, наблюдая за искрением.

В машинах большой мощности, работающих с большими перегрузками, кроме дополнительных полюсов применяют *компенсационную обмотку*, соединяемую последовательно с обмоткой якоря. Поле компенсационной обмотки нейтрализует поперечную реакцию якоря под главными полюсами.

Необходимо отметить, что для хорошей коммутации нужно также, чтобы коллектор был цилиндрическим и гладким, щетки хорошо притертыми к коллектору и легко передвигались в обоймах щеткодержателей, пружины щеткодержателей нормально натянутыми и машина не была перегружена.

#### 1.4 Генераторы постоянного тока

Генератор, в котором обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника тока (аккумулятора, батареи или другой машины постоянного тока), называют **генератором с независимым возбуждением** (рисунок 1.27, а). Генераторы независимого возбуждения делятся на генераторы с электромагнитным возбуждением, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от постороннего источника (аккумуляторная батарея, вспомогательный генератор, возбудитель постоянного тока или выпрямитель переменного тока), и на магнитоэлектрические генераторы с полюсами в виде постоянных магнитов. Генераторы последнего типа изготавливаются только на малые мощности.

Если напряжение на обмотку возбуждения подается с зажимов якоря того же генератора, то его называют **генератором с самовозбуждением**. В зависимости от того, каким образом присоединена в этих генераторах обмотка возбуждения к обмотке якоря, различают генераторы параллельного возбуждения, или шунтовые (рисунок 1.27, б), последовательного возбуждения, или серийные (рисунок 1.27, в) и смешанного возбуждения или компаундные (рисунок 1.27, г).

На практике в основном наиболее распространены ГПТ малой и средней мощности, которые большей частью имеют параллельное или смешанное возбуждение, т. к. не требуется отдельный источник питания индуктора. Крупные машины постоянного тока часто работают с независимым возбуждением. Генераторы с последовательным возбуждением менее распространены.

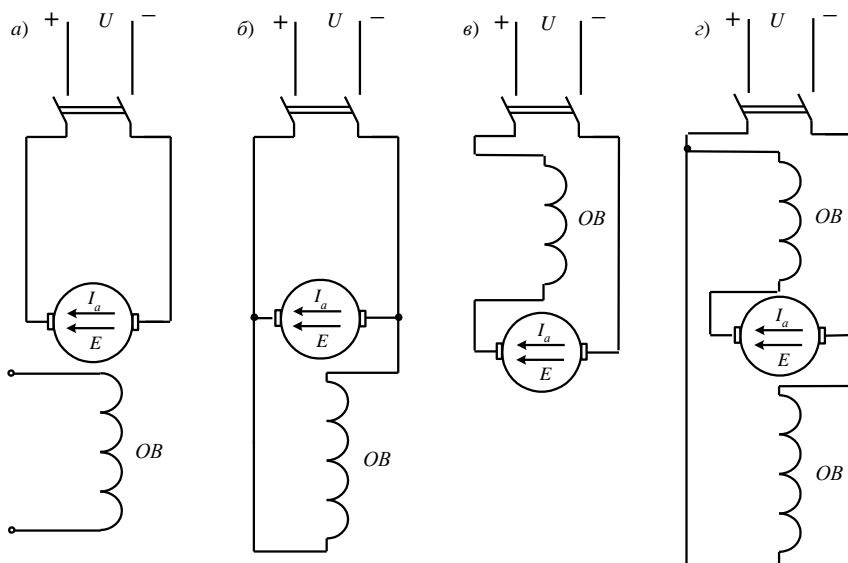


Рисунок 1.27 – Схемы генераторов независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения

**Генераторы независимого возбуждения.** Свойства генераторов анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают зависимости между основными величинами, определяющими работу генераторов. Такими основными величинами являются: 1) напряжение на зажимах  $U$ ; 2) ток возбуждения  $I_B$ ; 3) ток якоря  $I_a$  или ток нагрузки  $I$ ; 4) частота вращения  $n$ .

Обычно генераторы работают при  $n = \text{const}$ . Поэтому основные характеристики генераторов определяются при  $n = n_n = \text{const}$ .

Рассмотрим три основных характеристики генераторов:

- 1) холостого хода;
- 2) внешнюю;
- 3) регулировочную.



Рисунок 1.28 – Характеристика холостого хода

Характеристикой *холостого хода* генератора называется зависимость напряжения на зажимах якоря от тока возбуждения  $U = f(I_B)$ , снятая при отсутствии нагрузки ( $n = \text{const}$ ). Снятие характеристики целесообразно начать с максимального напряжения  $U \approx (1,15 \dots 1,25)U_n$  (рисунок 1.28). Из-за насыщения магнитной цепи напряжение вначале уменьшается по нисходящей ветви характеристики медленно, а затем быстрее.

При  $I_B = 0$  генератор развивает напряжение

$U_{\text{ост}}$ , которое обычно составляет 2–3 % от  $U_n$  вследствие остаточной намагниченности полюсов и ярма индуктора. Характеристика холостого хода имеет вид неширокой гистерезисной петли из-за явления гистерезиса в магнитной цепи индуктора. При снятии характеристики холостого хода ток  $I_B$  необходимо менять по нисходящей ветви (см. рисунок 1.28), так как в противном случае точки будут рассеиваться, а не ложиться на данную гистерезисную петлю.

Характеристика холостого хода позволяет судить о степени насыщения магнитной цепи машины при номинальном напряжении, проверять соответствие расчетных данных экспериментальным и составляет основу для исследования эксплуатационных свойств машины.

Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения  $U = f(I_a)$  при  $I_B = \text{const}$  и  $n = \text{const}$  (рисунок 1.29) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки в естественных условиях, когда ток возбуждения не регулируется.

При увеличении тока  $I_a$  напряжение  $U$  несколько уменьшается по двум причинам: вследствие падения напряжения в цепи якоря  $I_a r_a$  [см. уравнение (1.2)] и уменьшения ЭДС  $E$ , ввиду снижения потока под воздействием поперечной реакции якоря. При дальнейшем увеличении  $I_a$  напряжение начинает падать быстрее, так как под воздействием реакции якоря поток уменьшается и рабочая точка смещается на более круто падающий участок кривой намагничивания.

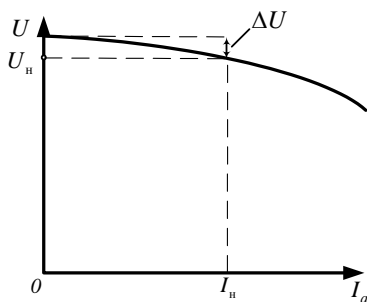


Рисунок 1.29 – Внешняя характеристика генератора

Внешнюю характеристику рекомендуется снимать при токе возбуждения  $I_B = I_{Bн}$ , который обеспечивает номинальное значение тока нагрузки при номинальном напряжении  $U = U_n$ . С уменьшением тока нагрузки до нуля напряжение на зажимах генератора возрастает на значение  $\Delta U$ , которое называется номинальным изменением напряжения генератора.

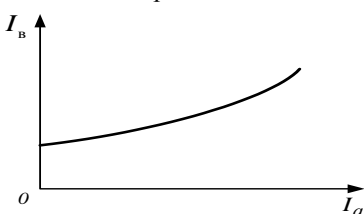


Рисунок 1.30 – Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

1.30). С ростом  $I_a$  ток  $I_B$  необходимо несколько увеличивать, чтобы компенсировать влияние падения напряжения  $I_a r_a$  и реакцию якоря.

**Генераторы параллельного возбуждения.** *Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения.* При пуске генератора с самовозбуждением начальный ток в обмотке возбуждения возникает за счёт ЭДС, наводимой в обмотке якоря остаточным магнитным полем главных полюсов. Для поддержания самовозбуждения необходимо, чтобы начальный ток усиливал это поле. Добавочный магнитный поток увеличивает ЭДС якоря и, как следствие, ток в обмотках главных полюсов. Однако из-за магнитного насыщения магнитопровода одинаковым приращениям увеличивающегося тока возбуждения соответствуют всё меньшие приращения магнитного потока. Процесс самовозбуждения продолжается до тех пор, пока ЭДС якоря превосходит падение напряжения в обмотке возбуждения. При определённой величине магнитного потока наступает электрическое равновесие, а дальнейшее повышение магнитного потока, ЭДС якоря и тока возбуждения прекращается. Самовозбуждение может осуществляться при величине сопротивления обмотки возбуждения, не превышающей известного предельного значения, зависящего от электрических параметров генератора. Поэтому для самовозбуждения необходимо выполнение следующих трех условий:

- 1) наличие остаточного магнитного потока полюсов;
- 2) правильное подключение концов обмотки возбуждения, при котором остаточный магнитный поток совпадает по направлению с потоком обмотки возбуждения;
- 3) сопротивление цепи возбуждения  $r_b$  при данной скорости вращения  $n$  должно быть ниже некоторого критического значения, или частота вращения при данном  $r_b$  должна быть выше некоторого критического значения.

Для самовозбуждения достаточно, чтобы остаточный поток составлял 2–3 % от номинального. Остаточный поток такого значения практически всегда имеется в уже работавшей машине. Вновь изготовленную машину или машину, которая по каким-либо причинам размагнитилась, можно намагнитить, пропуская через обмотку возбуждения ток от постороннего источника.

Так как ток  $I_b$  мал, то  $U \approx E$ , и характер кривой холостого хода у генератора с параллельным возбуждением будет такой же, как и у генератора с независимым возбуждением. Внешняя характеристика  $U = f(I_a)$  при  $r_b = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$  генератора параллельного возбуждения падает круче (рисунок 1.31, а, линия 2), чем у генератора независимого возбуждения, так как, помимо падения напряжения  $I_a r_a$  и реакции якоря, еще влияет уменьшение тока  $I_b$  при уменьшении  $U$ . Регулировочная характеристика ГПТ параллельного возбуждения представлена линией 2 на рисунке 1.31, б.

**Генераторы смешанного возбуждения.** Они имеют две обмотки возбуждения, расположенные на общих главных полюсах: параллельную и последовательную. Если эти обмотки создают намагничивающую силу одинакового направления, то их включение называется согласным; в противном случае соединение обмоток возбуждения называется встречным. Обычно

применяется согласное включение обмоток возбуждения, причем чаще всего основная часть намагничивающей силы возбуждения (65–80 %) создается параллельной обмоткой возбуждения.

Генератор смешанного возбуждения самовозбуждается так же, как и генератор параллельного возбуждения, и их характеристики холостого хода аналогичны.

На рисунке 1.31 сопоставлены внешние и регулировочные характеристики генераторов различных типов. Генератор смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки возбуждения имеет самую благоприятную внешнюю характеристику. Его напряжение при надлежащем выборе намагничивающей силы последовательной обмотки мало изменяется с изменением нагрузки.

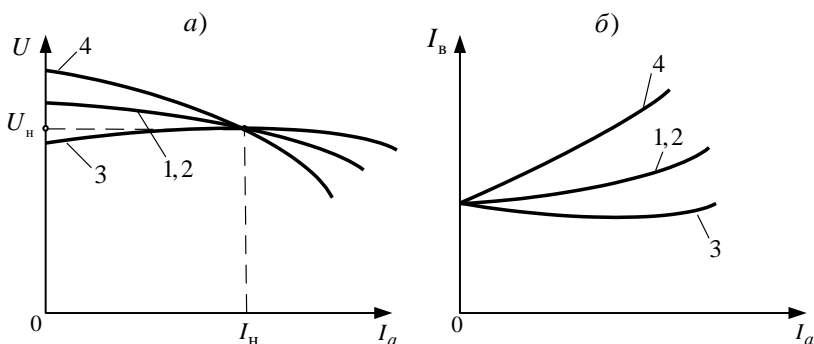


Рисунок 1.31 – Сравнение внешних (а) и регулировочных (б) характеристик генераторов независимого (1), параллельного (2), смешанного возбуждения с согласным (3) и встречным (4) включением последовательной обмотки

### 1.5 Двигатели постоянного тока

По **способу возбуждения** двигатели постоянного тока подразделяются аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Двигатель параллельного возбуждения. Рассмотрим более подробно характеристики двигателя параллельного возбуждения, которые определяют его рабочие свойства.

Решая совместно выражения (1.3) и (1.4) относительно  $n$ , находим уравнение скоростной характеристики  $n = f(I_a)$

$$n = \frac{U - I_a r_a}{c_E \Phi}. \quad (1.7)$$

Выразив  $I_a$  из формулы (1.6) и подставив в выражение (1.7), получим уравнение механической характеристики  $n = f(M)$ , которое определяет за-



висимость частоты вращения двигателя от развиваемого электромагнитного момента

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a M}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (1.8)$$

Скоростная и механическая характеристики двигателя определяются равенствами (1.7) и (1.8) при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ . При отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря эти характеристики называются *естественными*.

При увеличении  $I_a$  поток  $\Phi$  несколько уменьшится вследствие действия поперечной реакции якоря. В результате этого частота  $n$ , согласно выражению (1.7), будет стремиться возрасти. С другой стороны, падение напряжения  $I_a r_a$  вызывает уменьшение скорости. Ввиду того, что изменение  $\Phi$  относительно мало, механические характеристики  $n = f(M)$  двигателя параллельного возбуждения, определяемые равенством (1.8), при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$  совпадают по виду с характеристиками  $n = f(I_a)$  (рисунок 1.32). По этой же причине эти характеристики практически прямолинейны.

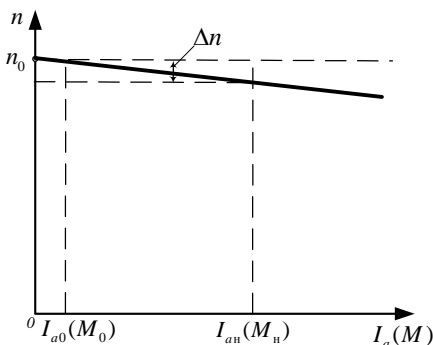


Рисунок 1.32 – Скоростная и механическая естественная характеристика двигателя параллельного возбуждения

Изменение частоты вращения  $\Delta n$ , при переходе от холостого хода  $[I_{a0}(M_{a0})]$  к номинальной нагрузке  $[I_{an}(M_{an})]$ , для двигателя параллельного возбуждения при работе на естественной характеристике мало и составляет 2–8 % от  $n_n$ . Такие слабо падающие характеристики называются *жесткими*. Двигатели параллельного возбуждения с жесткими характеристиками применяются в установках, в которых требуется, чтобы частота вращения при изменении нагрузки сохранялась почти постоянной (металлорежущие станки, прокатные станы).

*Регулировать частоту вращения ДПТ* можно тремя способами: 1) изменением магнитного потока  $\Phi$ ; 2) включением добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря; 3) изменением питающего напряжения  $U$ .

*Регулирование частоты вращения с помощью ослабления магнитного потока* производится обычно с помощью реостата в цепи возбуждения  $R_{pв}$ . При отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря ( $R_{pa} = 0$ ) и  $U = \text{const}$  характеристики  $n = f(I_a)$  и  $n = f(M)$ , определяемые равенствами (1.7) и (1.8), для разных  $I_b$  или  $\Phi$  имеют вид, показанный на рисунке 1.33. На графике  $M_{ст}$  – статический момент нагрузки двигателя (момент сопротивления

механизма, приводимого во вращение, с учетом механических потерь в самом двигателе). Характеристики  $n = f(I_a)$  сходятся на оси абсцисс ( $n = 0$ ) в общей точке при весьма большом токе  $I_a = U/r_a$ .

Нижняя характеристика на рисунке 1.33 соответствует номинальному потоку. Значения  $n$  при установившемся режиме работы соответствуют точкам пересечения рассматриваемых характеристик с кривой  $M_{ст} = f(n)$  для постоянной нагрузки (штриховая линия на рисунке 1.33).

*Регулирование частоты вращения с помощью сопротивления в цепи якоря.* Если последовательно в цепь якоря включить добавочное сопротивление  $R_{pa}$ , то вместо выражений (1.7) и (1.8) получим

$$n = \frac{U - I_a (r_a + R_{pa})}{c_E \Phi} \quad \text{и} \quad n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{(r_a + R_{pa})M}{c_E c_M \Phi^2}.$$

Сопротивление  $R_{pa}$  может быть регулируемым и должно быть рассчитано на длительную работу.

Характеристики  $n = f(I_a)$  и  $n = f(M)$  для различных значений  $R_{pa}$  при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$  изображены на рисунке 1.34. Верхняя характеристика – естественная. При больших значениях  $R_{pa}$  характеристики становятся крутопадающими (мягкими).

Регулирование частоты вращения ДПТ путем изменения подаваемого напряжения питания требует наличия соответствующего источника. В качестве источника с регулируемым значением выходного напряжения можно использовать управляемый выпрямитель. Если невозможно регулировать напряжение источника питания, то в таком случае двигатель подключают через импульсный регулятор, который превращает подаваемое на его вход напряжение источника в последовательность импульсов, близких к прямоугольной форме. Изменяя период следования импульсов и их длительность, можно изменять среднее значение, подаваемое на двигатель напряжения.

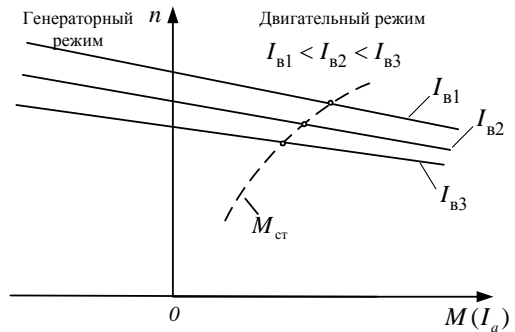


Рисунок 1.33 – Механические и скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения при разных токах возбуждения

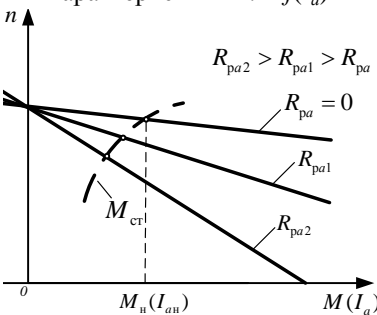


Рисунок 1.34 – Механические и скоростные характеристики регулирования частоты вращения с помощью сопротивления в цепи якоря

Таким образом, импульсный метод позволяет регулировать частоту вращения двигателя при его питании от источника с неизменным напряжением в широких пределах с малыми потерями энергии в регулировочной аппаратуре. Данный метод позволяет также производить пуск двигателя без пускового реостата. Импульсный способ регулирования в экономическом отношении весьма выгоден для управления двигателями, работающими в режимах переменной частоты вращения с частыми пусками.

На рисунке 1.35 изображены рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения. Они представляют собой зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , тока  $I_a$ , частоты вращения  $n$ , момента  $M$  и КПД  $\eta$ , от отдаваемой мощности  $P_2$  на валу двигателя при  $U = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$ .

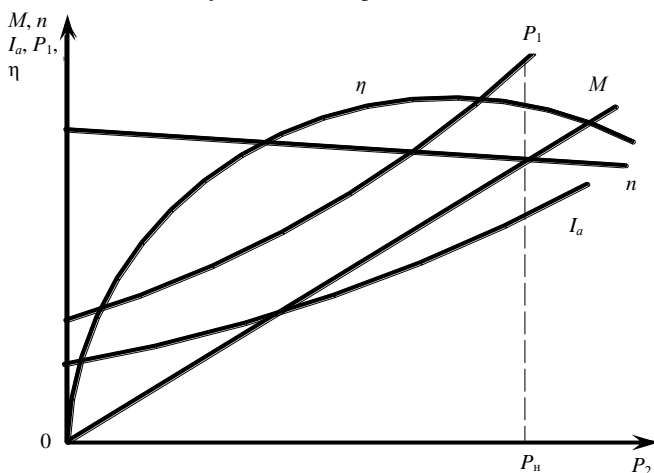


Рисунок 1.35 – Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Характеристика  $n = f(P_2)$ , как следует из рассмотренных выше положений, является линейной, а зависимости  $P_1 = f(P_2)$ ,  $I_a = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  имеют вид, общий для всех электрических машин. Зависимость момента на валу двигателя  $M = f(P_2)$  представляет собой почти прямую линию, так как момент пропорционален нагрузке на валу:  $M = P_2/\omega$ .

**Пример 1.4.** Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: мощность на валу  $P_n = 70$  кВт, напряжение на зажимах двигателя  $U_n = 220$  В, номинальная частота вращения якоря  $n = 600$  об/мин, коэффициент полезного действия  $\eta_n = 88\%$ , ток возбуждения  $i_{вн} = 0,025 I_n$ , потери мощности в цепи якоря  $\Delta P_{ан} = 2500$  Вт. Механические потери в стали и добавочные потери считаем постоянными.

Необходимо:

1 Определить для номинального режима работы момент на валу двигателя  $M_n$ , ток якоря  $I_{ан}$ , ток обмотки возбуждения  $I_{вн}$  и ток, потребляемый из сети  $I_n$ .

2 Найти сопротивление цепи возбуждения  $r_b$  и цепи якоря  $r_a$ , сопротивление пускового реостата  $r_{\text{пуск}}$ , чтобы пусковой ток был в 2,5 раза больше номинального.

3 Рассчитать и построить графики зависимостей  $n = f(I_a)$ ,  $n = f(M)$ ,  $\eta = f(I_a)$ .

4 Определить пределы изменения частоты вращения двигателя при регулировании добавочного сопротивления в цепи якоря от 0 до  $4r_a$  и токе  $I_a = I_{\text{ан}}$ .

*Решение.* Номинальный момент на валу двигателя

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \frac{70 \cdot 10^3}{600} = 1114 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_{\text{н}} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{70 \cdot 10^3}{0,88} = 79545 \text{ Вт}.$$

Ток, потребляемый из сети в номинальном режиме,

$$I_n = \frac{P_{\text{н}}}{U_n} = \frac{79,545 \cdot 10^3}{220} = 361,57 \text{ А}.$$

Ток обмотки возбуждения в номинальном режиме работы

$$I_b = i_b I_n = 0,025 \cdot 361,57 = 9,04 \text{ А}.$$

Номинальный ток якоря

$$I_{\text{ан}} = I_n - I_b = 361,57 - 9,04 = 352,53 \text{ А}.$$

Сопротивление цепи возбуждения

$$r_b = \frac{U_n}{I_b} = \frac{220}{9,04} = 24,33 \text{ Ом}.$$

Сопротивление цепи якоря

$$r_a = \frac{\Delta P_{\text{ан}}}{I_{\text{ан}}^2} = \frac{2500}{352,53^2} = 0,02 \text{ Ом}.$$

Сопротивление пускового реостата, ограничивающего пусковой ток в 2,5 раза больше номинального,

$$r_{\text{пуск}} = \frac{U_n}{I_{\text{апуск}}} - r_a = \frac{U_n}{2,5 I_{\text{ан}}} - r_a = \frac{220}{2,5 \cdot 352,53} - 0,02 = 0,226 \text{ Ом}.$$

ПротивоЭДС, индуцируемая в обмотке якоря при номинальной частоте вращения,

$$E_n = U_n - r_a I_{\text{ан}} = 220 - 0,02 \cdot 352,53 = 212,9 \text{ В}.$$

Частота вращения якоря в режиме идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{n_n U_n}{E_n} = \frac{600 \cdot 220}{212,9} = 620 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Определим частоту вращения двигателя при сопротивлении в цепи якоря  $r_d = 4r_a$  и токе  $I_a = I_{\text{ан}}$ :

$$n = n_n \frac{U_n - (r_a + 4r_a) I_{\text{ан}}}{E_n} = 600 \frac{220 - (0,02 + 4 \cdot 0,02) \cdot 352,53}{212,9} = 520 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Рассчитаем мощности потерь двигателя в номинальном режиме:

– суммарные

$$P_{\Sigma} = P_{1н} - P_{н} = 79,545 \cdot 10^3 - 70 \cdot 10^3 = 9545 \text{ Вт.}$$

– в цепи возбуждения

$$P_{вн} = r_{в} I_{вн}^2 = 24,33 \cdot 9,04^2 = 1988,3 \text{ Вт.}$$

– в цепи якоря (из условия задачи)

$$\Delta P_{ан} = 2500 \text{ Вт.}$$

– механические, добавочные и потери в стали

$$P_{ост} = (P_{мех} + P_{ст} + P_{доб}) = P_{\Sigma} - P_{вн} - P_{ан} = 9545 - 1988,3 - 2500 = 5056,7 \text{ Вт.}$$

На рисунке 1.36 представлена механическая естественная характеристика двигателя параллельного возбуждения  $n = f(M)$ , построенная по двум точкам:

– холостой ход ( $M = 0$ ;  $n_0 = 620$  об/мин);

– номинальный режим работы ( $M_{н} = 1114$  Нм;  $n_{н} = 600$  об/мин).

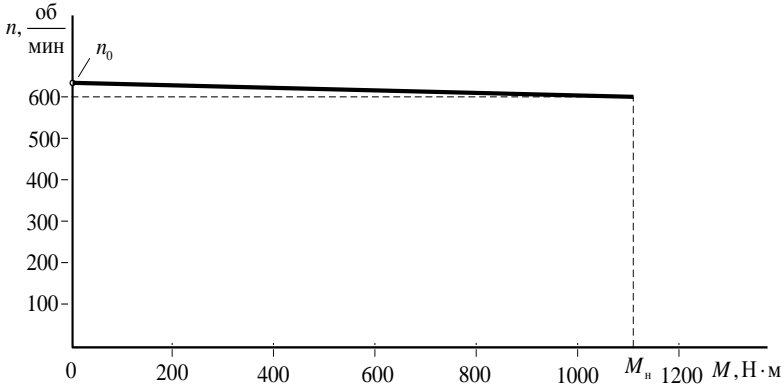


Рисунок 1.36 – Механическая естественная характеристика  $n = f(M)$

На рисунке 1.37 представлена зависимость  $n = f(I_a)$ , построенная по двум точкам:

– холостой ход ( $I_a = 0$ ;  $n_0 = 620$  об/мин);

– номинальный режим работы ( $I_{ан} = 352,53$  А;  $n_{н} = 600$  об/мин).

Рассчитаем график зависимости  $\eta = f(I_a)$ , задаваясь значениями 0, 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25  $I_{ан}$ . В расчетах (например, для значения 0,25  $I_{ан}$ ) используем следующие формулы:

– мощность потребляемая из сети

$$P'_1 = U_{н} (0,25 I_{ан} + I_{вн}) = 220 \cdot (0,25 \cdot 352,53 + 9,04) = 21378 \text{ Вт;}$$

– мощность на валу двигателя

$$P'_2 = P'_1 - P_{вн} - (P_{мех} + P_{ст} + P_{доб}) - 0,25^2 P_{ан} = 21378 - 1988,3 - 5056,7 - 0,25^2 \cdot 2500 = 14177 \text{ Вт;}$$

– КПД при 0,25  $I_{ан}$

$$\eta = \frac{P'_2}{P'_1} = \frac{14177}{21378} = 0,663.$$

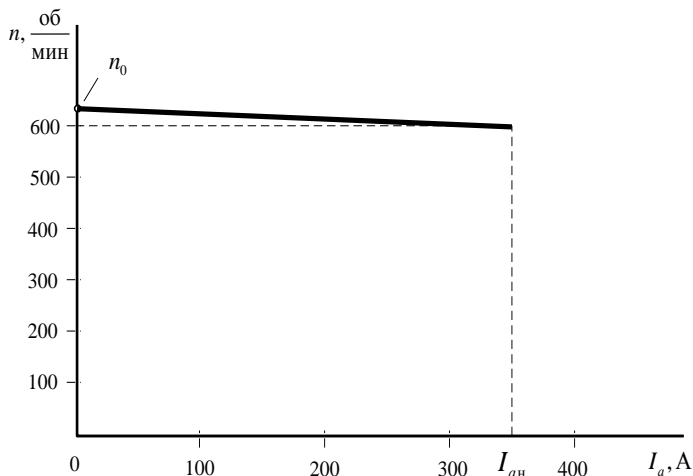


Рисунок 1.37 – Зависимость  $n = f(I_a)$

Результаты расчета зависимости  $\eta = f(I_a)$  представлены в таблице 1.4 и на рисунке 1.38.

Таблица 1.4 – Результаты расчета зависимости  $\eta = f(I_a)$

$I_a, A$	0	88,1	176,27	264,4	352,53	440,66
$\eta$	0	0,663	0,812	0,86	0,88	0,889

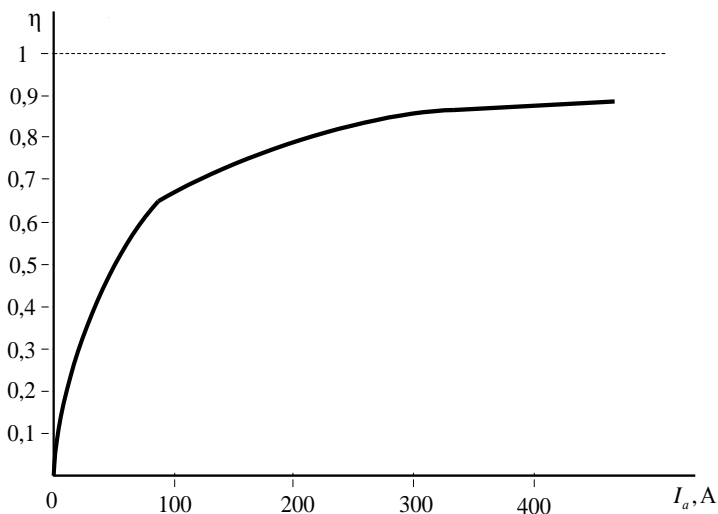


Рисунок 1.38 – Зависимость  $\eta = f(I_a)$

Двигатель последовательного возбуждения. В двигателях последовательного возбуждения ток якоря одновременно является также током возбуждения:  $I_a = I_b = I$ . Ток якоря такого двигателя изменяется в широких пределах, а вместе с ним изменяется магнитный поток  $\Phi$ . Можно написать, что  $\Phi = k_\Phi I$ , тогда формула (1.5) примет вид  $M = c_M k_\Phi I^2$ .

Коэффициент пропорциональности  $k_\Phi$  в значительном диапазоне нагрузок, при  $I < I_n$  является практически постоянным, и лишь при  $I > 0,8I_n$  вследствие насыщения магнитной цепи начинает несколько уменьшаться.

Скоростная характеристика двигателя, представленная на рисунке 1.39, является мягкой и имеет гиперболический характер. При  $k_\Phi = \text{const}$  вид кривой  $n = f(I)$  показан штриховой линией.

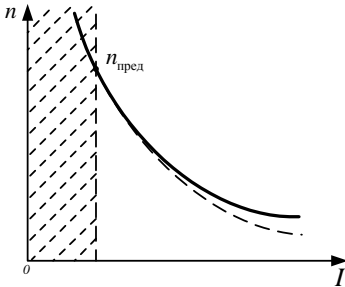


Рисунок 1.39 – Естественная скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения

При небольшой нагрузке на валу, исходя из естественной механической характеристики двигателя (кривая 1 на рисунке 1.40), частота вращения двигателя резко возрастает ("разнос"), и возникает круговой огонь на коллекторе машины. Поэтому работа *двигателей последовательного возбуждения на холостом ходу не допускается*, а использование ременной передачи не-

приемлемо. Обычно минимально допустимая нагрузка  $P_2 \approx 0,2P_n$ , при которой частота может достигнуть значения  $n > n_{\text{пред}}$ , опасная для двигателя.

Поскольку у двигателей параллельного возбуждения  $M \sim I_a$ , а у двигателей последовательного возбуждения  $M \sim I_a^2$ , то двигатели последовательного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент. Для двигателей параллельного возбуждения  $n \approx \text{const}$ , а для двигателей последовательного возбуждения  $n \propto U/\sqrt{M}$ .

Поэтому для двигателей параллельного возбуждения  $P_2 \sim M$ , а при последовательном возбуждении  $P_2 \sim \sqrt{M}$ . В связи с этим двигатели последовательного возбуждения имеют существенные преимущества в случаях тяжелых условий пуска, т. к. создают большой пусковой момент. Они находят применение для электрической тяги (трамвай, метро, электровозы на железных дорогах).

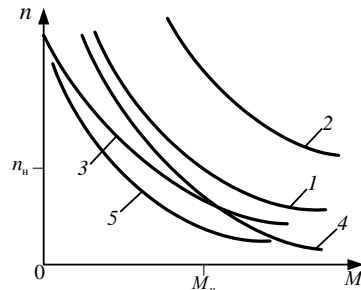


Рисунок 1.40 – Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при разных способах регулирования частоты вращения

*Регулирование частоты вращения посредством ослабления поля.* Регулирование  $n$  посредством ослабления поля производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением, либо уменьшением числа включенных в работу витков обмотки возбуждения. В последнем случае должны быть предусмотрены соответствующие выводы из обмотки возбуждения (кривая 2 на рисунке 1.40).

*Регулирование частоты вращения путем шунтирования якоря.* При шунтировании якоря ток и поток возбуждения возрастают, а частота уменьшается. Так как падение напряжения  $R_a I_a$  мало, то сопротивление  $R_{ша}$  практически находится под полным напряжением сети, его значение должно быть значительным, потери в нем будут велики и КПД сильно уменьшится (см. кривую 3 на рисунке 1.40). Кроме того, шунтирование якоря эффективно только тогда, когда магнитная цепь не насыщена.

*Регулирование частоты вращения включением сопротивления в цепь якоря.* Этот способ позволяет регулировать  $n$  вниз от номинального значения (см. кривую 4 на рисунке 1.40). Так как при этом способе значительно снижается КПД, то он находит ограниченное применение.

*Регулирование частоты вращения изменением напряжения.* Этим способом можно регулировать  $n$  вниз от номинального значения с сохранением высокого КПД. Рассматриваемый способ регулирования широко применяется в транспортных установках, где на каждой ведущей оси устанавливается отдельный двигатель, и регулирование осуществляется путем переключения двигателей с параллельного включения в сеть на последовательное (см. кривую 5 на рисунке 1.40).

На рисунке 1.41 приведены рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения.

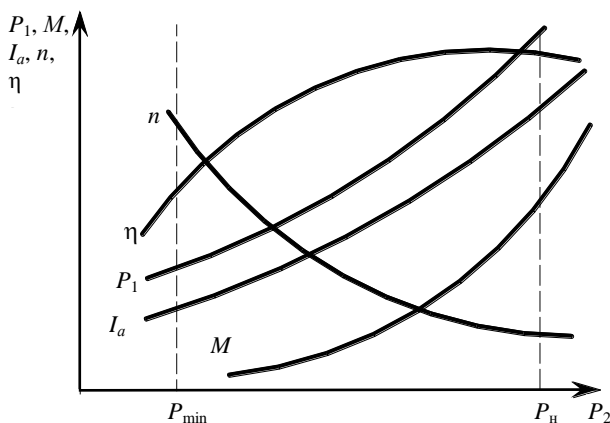


Рисунок 1.41 – Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения



**Пример 1.5.** Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: мощность на валу  $P_n = 2500$  Вт, напряжение на зажимах двигателя  $U_n = 220$  В, номинальная частота вращения якоря  $n = 1100$  об/мин, потери мощности в цепях обмотки якоря  $\Delta P_{ан} = 310$  Вт и обмотки возбуждения якоря  $\Delta P_{вн} = 300$  Вт, прочие потери мощности  $\Delta P_M = 50$  Вт.

Необходимо:

1 Найти мощность, потребляемую из сети  $P_{1н}$ , ток двигателя  $I_n$ , момент на валу  $M_n$ .

2 Сопротивление якорной обмотки  $r_a$  и обмотки возбуждения  $r_b$ .

3 Построить зависимости частоты вращения якоря и момента от тока якоря, т. е.  $n = f(I_a)$  и  $M = f(I_a)$ . Используя указанные зависимости, рассчитать и построить механическую характеристику двигателя  $n = f(M)$ .

При выполнении п. 3 необходимо учесть насыщение магнитопровода, используя зависимость  $\frac{\Phi}{\Phi_n} = f\left(\frac{I_B}{I_{Bн}}\right)$ , приведенную в таблице 1.5.

**Таблица 1.5 – Зависимость магнитного потока от тока возбуждения**

$\frac{\Phi}{\Phi_n}$	0,05	0,26	0,48	0,7	0,9	1
$\frac{I_B}{I_{Bн}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

*Решение.* Номинальный момент на валу двигателя

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \frac{2500}{1100} = 21,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети, при номинальном режиме работы

$$P_{1н} = P_n + \Delta P_{ан} + \Delta P_{вн} + \Delta P_M = 2500 + 300 + 310 + 50 = 3160 \text{ Вт}.$$

Ток, потребляемый из сети в номинальном режиме,

$$I_n = \frac{P_{1н}}{U_n} = \frac{3160}{220} = 14,36 \text{ А}.$$

Сопротивление цепи возбуждения

$$r_b = \frac{\Delta P_{вн}}{I_n^2} = \frac{300}{14,36^2} = 1,454 \text{ Ом}.$$

Сопротивление цепи якоря

$$r_a = \frac{\Delta P_{ан}}{I_n^2} = \frac{310}{14,36^2} = 1,5 \text{ Ом}.$$

Для определения частоты вращения якоря при токах  $I_a = (0,2; 0,4; 0,6; 0,8)I_n$  необходимо воспользоваться зависимостью  $\frac{\Phi}{\Phi_n} = f\left(\frac{I_B}{I_{Bн}}\right)$ , приведенную в таблице 1.3.

Учитывая, что у двигателя последовательного возбуждения  $I_a = I_B$ , то, задаваясь значениями тока и данными из условия для номинальной частоты вращения двигателя,

определяем частоты вращения по формуле (1.7)

$$n = n_n \left( \frac{\Phi_n}{\Phi} \right) \frac{U_n - \left( \frac{I_B}{I_{Bn}} \right) (r_a + r_B) I_n}{U_n - (r_a + r_B) I_n}.$$

Выполним подстановку чисел для расчета частоты вращения при  $I_a = 0,2 I_n$ :

$$n = 1100 \cdot \left( \frac{1}{0,26} \right) \cdot \frac{220 - 0,2 \cdot (1,454 + 1,5) \cdot 14,36}{220 - (1,454 + 1,5) \cdot 14,36} = 5039,3 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Для расчета момента на валу используем формулу  $M = c_M \Phi I_a$ , с учетом номинального режима выразим  $c_M \Phi_n = M_n / I_n$ . Тогда при любом режиме работы двигателя (при любом токе  $I_a$ )

$$M = c_M \Phi I_a = M_n \left( \frac{\Phi}{\Phi_n} \right) \left( \frac{I_B}{I_{Bn}} \right).$$

Выполним подстановку чисел для расчета частоты вращения при  $I_a = 0,2 I_n$ :

$$M = 21,7 \cdot 0,26 \cdot 0,2 = 1,128 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Результаты расчета частоты вращения и момента представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Результаты расчета

$\Phi/\Phi_n$	0,26	0,48	0,7	0,9	1
$I_B / I_{Bn}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$I_a, \text{А}$	2,87	5,74	8,62	11,49	14,36
$M, \text{Нм}$	1,128	4,17	9,12	15,63	21,7
$n, \text{об/мин}$	5039,3	2620,6	1721,8	1280,7	1100

На основании результатов расчета, представленных в таблице 1.4, построим зависимости  $n = f(M)$ ,  $n = f(I_a)$  и  $M = f(I_a)$ , представленные соответственно на рисунках 1.42–44.

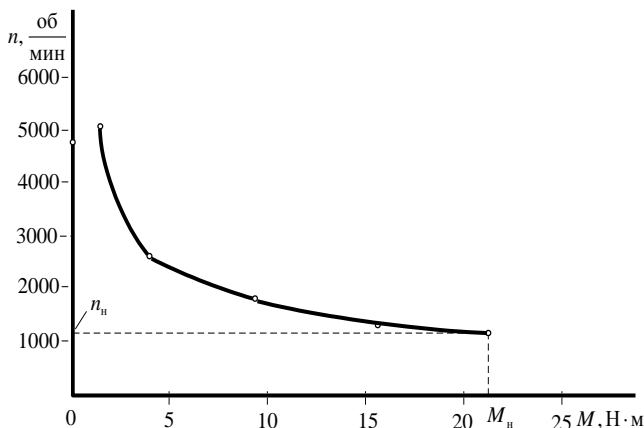


Рисунок 1.42 – Механическая характеристика  $n = f(M)$

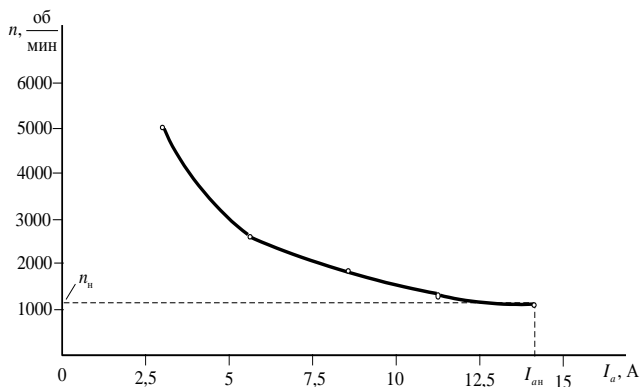


Рисунок 1.43 – Зависимость  $n = f(I_a)$

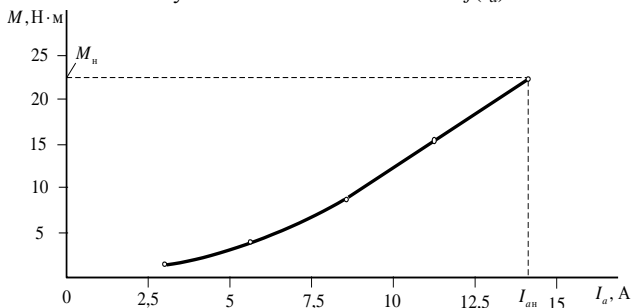


Рисунок 1.44 – Зависимость  $M = f(I_a)$

Двигатель смешанного возбуждения. При согласном включении последовательной обмотки возбуждения поток  $\Phi$  с увеличением нагрузки возрастает. Поэтому такой двигатель смешанного возбуждения имеет более мягкую механическую характеристику (рисунок 1.45, кривая 3) по сравнению с двигателем параллельного возбуждения (рисунок 1.45, кривая 1), но более жесткую по сравнению с двигателем последовательного возбуждения (рисунок 1.45, кривая 2). В зависимости от назначения двигателя доля последовательной обмотки в создании полной намагничивающей силы возбуждения может меняться в широких пределах.

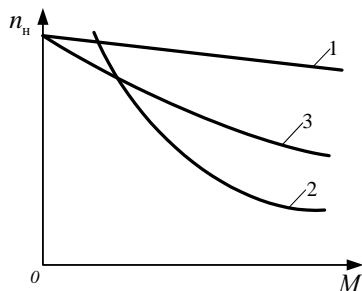


Рисунок 1.45 – Естественные механические характеристики двигателей параллельного (1), последовательного (2) и смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки (3)

Частота вращения двигателей смешанного возбуждения обычно регули-

руется так же, как и в двигателях параллельного возбуждения. Двигатели смешанного возбуждения применяются в условиях, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы значительные изменения частоты вращения при изменении нагрузки. Эти двигатели используются также в случаях, когда момент нагрузки изменяется в широких пределах, так как при этом мощность двигателя снижается, как и у двигателя с последовательным возбуждением. В связи с этим двигатели смешанного возбуждения применяются для привода на постоянном токе троллейбусов, компрессоров, строгальных станков, печатных машин, кранах и т. д.

## 1.6 Пуск, реверсирование и торможение двигателей

При пуске двигателя в ход необходимо:

- 1) обеспечить надлежащий пусковой момент и условия для достижения необходимой частоты вращения;
- 2) предотвратить возникновение чрезмерного пускового тока, опасного для двигателя.

При пуске  $n = 0$ , согласно выражениям  $I_a = (U - E) / r_a$  и  $E = c_E n \Phi$  получим  $I_a = U / r_a$ . В нормальных машинах  $r_a$  мало, и поэтому при *прямом пуске* ток якоря недопустимо велик:  $I_a = (10-50)I_n$ .

Возможны **три способа пуска двигателя в ход**:

- 1) прямой, когда цепь якоря подключается непосредственно к сети на ее полное напряжение;
- 2) пусковым реостатом, включаемым последовательно в цепь якоря;
- 3) понижением напряжения в цепи якоря.

Прямой пуск применяется только для двигателей малой мощности до нескольких сотен ватт, у которых  $r_a$  относительно велико, и поэтому при пуске  $I_a \leq (4...6)I_n$ , а процесс пуска длится не более 1–2 с.

Пуск с помощью пускового реостата. При пуске  $n = 0$ , значит  $I_a = U / (R_a + R_n)$ , где  $R_n$  – сопротивление пускового реостата. Значение  $R_n$  подбирается так, чтобы в начальный момент пуска ток уменьшился до значения  $I_a = (1,4...1,7)I_n$  [в машинах малой мощности –  $(2...2,5)I_n$ ]. Число ступеней пускового реостата и значения их сопротивлений рассчитываются таким образом, чтобы при надлежащих интервалах времени переключения ступеней максимальные и минимальные значения тока  $I_a$  на всех ступенях получались одинаковыми. По условиям нагрева ступени реостата рассчитываются на *кратковременную* работу под током.

Ни в коем случае *нельзя допускать разрыва цепи параллельного возбуждения* двигателя, работающего без нагрузки. В этом случае поток возбуждения исчезает не сразу, а поддерживается индуктируемыми в ярме вихревыми токами. Однако этот поток будет быстро уменьшаться, и частота  $n$ , со-

гласно выражению (1.7), будет сильно увеличиваться («разнос» двигателя). При этом ток якоря значительно возрастет и возникнет круговой огонь, вследствие чего возможно повреждение машины, и поэтому в цепях возбуждения не ставят предохранителей и выключателей.

*Реверсирование* (изменение направления вращения двигателя) производится путем изменения направления действия вращающего момента. Для этого требуется изменить полярность обмотки возбуждения или якоря. При переключении и цепи возбуждения, и якоря направление вращения останется прежним.

*Торможение* необходимо для того, чтобы уменьшить время выбега двигателей, которое при отсутствии торможения может быть недопустимо велико, а также для фиксации приводимых механизмов в определенном положении.

Различают механическое и электрическое торможение.

При *механическом торможении* обычно производится прижатие тормозных колодок на тормозной диск. Недостатком механических тормозов является то, что тормозной момент и время торможения зависят от случайных факторов: попадания масла или влаги на тормозной диск и пр. Поэтому такое торможение применяется, когда не ограничены время и тормозной путь.

*Электрическое торможение* обеспечивает достаточно точное получение требуемого тормозящего момента, но не может обеспечить фиксацию механизма в заданном месте. Поэтому электрическое торможение при необходимости дополняется механическим, которое входит в действие после окончания электрического.

Возможны три способа электрического торможения.

Торможение *с возвратом энергии в сеть* (рекуперативное торможение). При этом ЭДС  $E$  должна быть больше напряжения источника питания  $U$ , и ток будет протекать в направлении ЭДС, являясь током генераторного режима. Запасенная кинетическая энергия будет преобразовываться в электрическую и частично возвращаться в сеть.

Торможение *противовключением* выполняется путем изменения направления электромагнитного момента, развиваемого двигателем. Для этого достаточно изменить направление магнитного потока. При таком изменении ЭДС  $E$  и напряжение  $U$  в якоре складываются, и для ограничения тока  $I$  следует включать резистор с начальным сопротивлением  $R_p \approx (U + E) / I_{\max}$ , где  $I_{\max}$  – наибольший допустимый ток. Торможение связано с большими потерями энергии.

*Динамическое* торможение выполняется при включении на зажимы вращающегося возбужденного двигателя резистора  $R_{\text{торм}}$ . Запасенная кинетическая энергия преобразуется в электрическую и рассеивается в  $R_{\text{торм}}$  как тепловая. Это наиболее распространенный способ торможения.

## 1.7 Потери мощности и коэффициент полезного действия машин постоянного тока

В электрических машинах преобразование механической энергии в электрическую и наоборот связано с потерями части энергии, которая в конечном счете переходит в тепло, вследствие чего происходит повышение температуры отдельных частей машины. Допустимые пределы превышения температуры машины над температурой окружающей среды определяются теплостойкостью изолирующих материалов и, в первую очередь, обмоток машины. В тех случаях, когда повышение температуры превосходит установленные пределы для данного класса изоляции, срок службы последней резко сокращается.

Различают основные и добавочные **потери мощности**, причем из основных, в свою очередь, выделяют постоянные и переменные. К постоянным потерям относят магнитные, или потери в стали машины, и механические.

*Магнитные потери* складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи. Первые из них вызываются в основном перемагничиванием стали якоря при вращении его в магнитном поле машины, а вторые – возникновением в магнитной системе вихревых токов.

Магнитные потери зависят от частоты  $f$  перемагничивания стали якоря, т. е. от скорости его вращения, и от величины магнитной индукции  $B$ .

Потери на гистерезис

$$P_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} \frac{f}{100} B_m^2 m,$$

где  $\sigma_{\Gamma}$  – коэффициент, зависящий от марки стали ( $\sigma_{\Gamma} \approx 2,4 \dots 4,7$ );

$B_m$  – максимальное значение магнитной индукции в стали якоря;

$m$  – масса стали.

Потери на вихревые токи

$$P_{\text{вх}} = \sigma_{\text{вх}} \left( \frac{f}{100} \right)^2 B_m^2 m,$$

где  $\sigma_{\text{вх}}$  – коэффициент, зависящий от толщины листов стали и ее качества ( $\sigma_{\text{вх}} = 0,6 \dots 5,6$  при толщине листов стали до 0,5 мм; для листов стали толщиной 1 мм  $\sigma_{\text{вх}}$  возрастает до 22,4).

Суммарные потери в стали

$$P_{\text{ст}} = P_{\Gamma} + P_{\text{вх}}.$$

*Механические потери* состоят из потерь в подшипниках, на трение щеток о коллектор, вентиляционных, которые включают в себя потери на трение частей машины о воздух. Механические потери зависят только от частоты вращения и не зависят от нагрузки. В машинах постоянного тока мощностью до 100 кВт данные потери составляют соответственно около 2–4 % от номинальной мощности машины.

К *переменным* потерям, которые называют также потерями в меди или электрическими потерями, относят потери на нагрев обмоток якоря и возбуждения и потери в щеточных контактах.

$$P_{эл} = I_a^2 r_a + I_b^2 r_b,$$

где  $I_a$  – ток якоря, А;

$r_a$  – сопротивление всей цепи якоря, Ом;

$I_b$  – ток возбуждения, А;

$r_b$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

К *добавочным* относят потери, вызванные различными вторичными явлениями, зависящими от тока нагрузки. Например, вследствие искажения кривой магнитного поля в воздушном зазоре при нагрузке под влиянием поперечной реакции якоря. В результате этого магнитный поток распределяется по зубцам и сечению спинки якоря неравномерно.

КПД машин постоянного тока

$$\eta = P_2/P_1,$$

где  $P_1$  – подводимая к машине мощность [у генератора – это механическая мощность, сообщаемая ему первичным двигателем (при независимом возбуждении  $P_1$  включает в себя также мощность для питания цепи обмотки возбуждения), у двигателя – мощность, потребляемая им от источника постоянного тока];

$P_2$  – полезная мощность машины (у генератора – это электрическая мощность, отдаваемая приемнику, для двигателя – механическая на валу).

Современные МПТ имеют высокий КПД: для мощностей 10 кВт КПД составляет 83–87 %, мощностью 100 кВт – 88–93 % и для мощности 1000 кВт – 92–96 %. Машинам большей мощности свойственен более высокий КПД.

### Контрольные вопросы

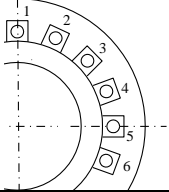
- 1 Области применения МПТ в генераторном и двигательном режимах.
- 2 Якорные обмотки, их особенности.
- 3 Объясните принцип действия ГПТ.
- 4 Объясните принцип действия ДПТ.
- 5 Как устроена машина постоянного тока?
- 6 Что понимают под реакцией якоря МПТ?
- 7 Какие существуют способы улучшения коммутации?
- 8 Внешние характеристики ГПТ с различными способами возбуждения.
- 9 Сущность процесса самовозбуждения и его условия.
- 10 Почему снижается напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением при увеличении тока нагрузки?
- 11 Скоростные и механические характеристики ДПТ различных типов возбуждения.
- 12 Охарактеризуйте механические, магнитные и электрические потери МПТ.
- 13 Как осуществляется реверсирование в ДПТ?
- 14 Почему во время работы ДПТ нельзя разрывать цепь возбуждения?
- 15 Перечислите способы регулирования частоты вращения ДПТ.
- 16 Как осуществляется пуск ДПТ?

## 1.8 Программа самоконтроля по разделу «Машины постоянного тока»

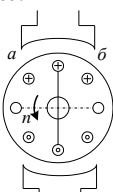
Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
1 Чему равна индуцированная в проводнике ЭДС, если $B = 1$ Тл, $l = 10$ см, $v = 1$ м/с?	1) 0,1 В; 2) 1 В; 3) 10 В; 4) 0	18 44 66 93	1.1
2 Какая ЭДС возникла в контуре, если магнитный поток, пронизывающий контур, равномерно уменьшился от 10 Вб до нуля в течение 2 с?	1) постоянная 5 В; 2) переменная с максимальным значением 5 В; 3) для решения задачи недостаточно данных	91 67 40	1.1
3 У какого генератора больше пульсация напряжения на щетках, если при прочих равных условиях второй генератор имеет в два раза больше коллекторных пластин, чем первый?	1) у первого; 2) у второго; 3) пульсации одинаковы; 4) для определенного ответа недостаточно данных	46 24 92 101	1.1
4 Что произойдет, если у ДПТ коллектор заменить двумя кольцами, через которые напряжение будет подводиться к витку?	1) частота вращения витка увеличится; 2) виток не будет вращаться; 3) частота вращения витка не изменится	37 68 105	1.1
5 Какое из уравнений 1) $E = U + I_a r_a$ ; 2) $I_a r_a = U - E$ характеризует: а) генератор; б) двигатель?	1) а) первое; б) второе; 2) а) второе; б) первое; 3) а) первое; б) первое	98 47 79	1.1
6 Назовите деталь, не принадлежащую коллектору?	1) ламель; 2) миканитовая прокладка; 3) втулка; 4) пружина	3 36 15 62	1.1
7 Определите напряжение сети, если номинальный ток двигателя 10 А, противоЭДС двигателя при номинальной скорости вращения 99 В, сопротивления цепи якоря 0,1 Ом?	1) 100 В; 2) 99 В; 3) 101	82 6 21	1.1



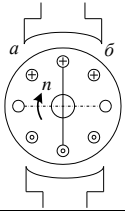
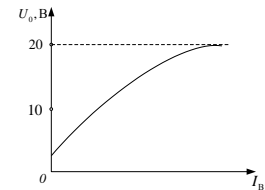
Продолжение таблицы

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
<p>8 Секция уложена в первом и четвертом пазах. Определите ширину секции.</p> 	<p>1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4</p>	<p>56 89 13 27</p>	<p>1.2</p>
<p>9 Простая петлевая обмотка четырехполюсной машины постоянного тока имеет 16 секций. Определите шаги обмотки</p>	<p>1) <math>y_k = 1; y = 1; y_1 = 8; y_2 = 7;</math> 2) <math>y_k = 1; y = 1; y_1 = 4; y_2 = 3;</math> 3) <math>y_k = 1; y = 1; y_1 = 4; y_2 = 5</math></p>	<p>70 108 72</p>	<p>1.2</p>
<p>10 Начало первой секции, рассматриваемой выше обмотки уложено в паз I. Укажите: а) номер паза, в котором лежит конец первой секции; б) номер паза, в который уложено начало второй секции</p>	<p>1) а) 4; б) 2; 2) а) 5; б) 2; 3) а) 4; б) 1</p>	<p>73 102 32</p>	<p>1.2</p>
<p>11 В простой волновой двухслойной обмотке четырехполюсной машины, имеющей 15 секций, начало первой секции припаяно к коллекторной пластине I. Укажите номер коллекторной пластины, к которой припаяны: а) конец первой секции; б) начало второй секции</p>	<p>1) а) 8; б) 15; 2) а) 7; б) 15; 3) а) 9; б) 9; 4) а) 4; б) 4</p>	<p>8 41 54 12</p>	<p>1.2</p>
<p>12 При прочих равных условиях частота вращения генератора увеличилась в 2 раза. Как изменилась ЭДС на зажимах машины?</p>	<p>1) не изменилась; 2) увеличилась в 2 раза; 3) для ответа на вопрос недостаточно данных</p>	<p>107 97 74</p>	<p>1.2</p>

Продолжение таблицы

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
13 Как изменился вращающий момент двигателя, если ток якоря и магнитный поток возбуждения увеличились в 2 раза?	1) увеличился в 2 раза; 2) увеличился в 4 раза; 3) не изменился	104 95 96	1.2
14 Реакцией якоря называют:	1) уменьшение магнитного поля машины при увеличении нагрузки; 2) искажение магнитного поля машины при увеличении нагрузки; 3) воздействие магнитного поля якоря на основное магнитное поле полюсов; 4) увеличение искрения под щетками машины	45 56 80 99	1.3
15 У двигателя без дополнительных полюсов при увеличении механической нагрузки на валу искрение под щетками увеличилось. Как уменьшить искрение?	1) повернуть щетки против направления вращения якоря; 2) повернуть щетки по направлению вращения якоря; 3) уменьшить механическую нагрузку на валу	64 33 20	1.3
16 Где должны находиться щетки машины, не имеющей дополнительных полюсов, чтобы коммутация была прямой?	1) на геометрической нейтральной; 2) на физической нейтральной; 3) за физической нейтральной	83 85 38	1.3
17 Как изменяется напряжение на зажимах генератора при увеличении нагрузки?	1) не изменяется; 2) увеличивается; 3) уменьшается	59 17 5	1.3
18 Якорь нагруженного генератора вращается против часовой стрелки. В какой из точек (а или б) результирующее магнитное поле слабее? 	1) в точке а; 2) в точке б; 3) ответить не представляется возможным, так как не обозначена полярность полюсов машины; 4) магнитное поле в обеих точках одинаково	75 100 71 60	1.3

Продолжение таблицы

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
<p>19 Якорь нагруженного двигателя вращается по часовой стрелке.</p> <p>В какой из точек (<i>a</i> или <i>b</i>) результирующее магнитное поле слабее?</p> 	<p>1) в точке <i>a</i>;</p> <p>2) в точке <i>b</i>;</p> <p>3) ответить не представляется возможным, так как не обозначена полярность полюсов машины;</p> <p>4) магнитное поле в обеих точках одинаково</p>	<p>31</p> <p>52</p> <p>65</p> <p>61</p>	<p>1.3</p>
<p>20 У генератора с параллельным возбуждением при увеличении нагрузки (укажите неверное продолжение фразы):</p>	<p>1) уменьшается ЭДС из-за увеличения реакции якоря;</p> <p>2) уменьшается напряжение на зажимах вследствие увеличения падения напряжения в обмотке якоря;</p> <p>3) уменьшается магнитный поток, создаваемый током возбуждения;</p> <p>4) уменьшается ЭДС остаточного магнетизма</p>	<p>25</p> <p>53</p> <p>69</p> <p>9</p>	<p>1.3 и 1.4</p>
<p>21 Какое из приведенных условий не является условием самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением?</p>	<p>1) наличие ЭДС остаточного магнетизма;</p> <p>2) правильная полярность тока в обмотке возбуждения;</p> <p>3) малое сопротивление обмотки возбуждения;</p> <p>4) большое сопротивление обмотки якоря</p>	<p>42</p> <p>65</p> <p>49</p> <p>84</p>	<p>1.4</p>
<p>22 Определите ЭДС остаточного магнетизма генератора по характеристике холостого хода?</p> 	<p>1) около 2 В;</p> <p>2) около 20 В;</p> <p>3) для ответа на данный вопрос недостаточно данных</p>	<p>2</p> <p>19</p> <p>51</p>	<p>1.4</p>

Продолжение таблицы

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
<p>23 Что произойдет с двигателем параллельного возбуждения, если рукоятку пускового реостата оставить в среднем положении после запуска двигателя?</p>	<p>1) магнитный поток возбуждения не достигнет номинального значения;                  2) секции пускового реостата перегреются и сгорят;                  3) сгорят предохранители, защищающие двигатель от перегрузок</p>	<p>77 88 86</p>	<p>1.5</p>
<p>24 Как изменится частота вращения двигателя параллельного возбуждения при уменьшении: а) <math>R_{рв}</math>; б) <math>R_n</math>?</p> 	<p>1) а) увеличится; б) уменьшится;                  2) а) уменьшится; б) увеличится;                  3) а) не изменится; б) увеличится</p>	<p>30 109 81</p>	<p>1.5</p>
<p>25 Приведены скоростные характеристики двигателей параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Укажите характеристику двигателя смешанного возбуждения.</p> 	<p>1) кривая 1;                  2) кривая 2;                  3) кривая 3;                  4) на графике ее нет</p>	<p>4 50 23 90</p>	<p>1.5</p>
<p>26 Как изменится частота вращения двигателя последовательного возбуждения при увеличении сопротивления <math>R_{рв}</math>?</p> 	<p>1) увеличится;                  2) уменьшится;                  3) не изменится</p>	<p>1 29 110</p>	<p>1.5</p>

Окончание таблицы

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
27 Что произойдет, если двигатель последовательного возбуждения подключить к сети при отключенной механической нагрузке на валу?	1) двигатель не запустится; 2) обмотка якоря перегреется; 3) двигатель пойдет «вразнос»; 4) будет вращаться с частотой, соответствующей частоте холостого хода	16 42 58 48	1.5
28 Во сколько раз пусковой момент двигателя последовательного возбуждения больше номинального, если пусковой ток двигателя превышает номинальный в 3 раза? (Насущением стали пренебречь)	1) в 3 раза; 2) в $\sqrt{3}$ раз; 3) в 9 раз	10 26 55	1.5
29 Что произойдет, если момент нагрузки на валу двигателя последовательного возбуждения уменьшить до нуля?	1) двигатель остановится; 2) якорь двигателя будет вращаться по инерции с постоянной частотой; 3) двигатель пойдет «вразнос»	11 22 106	1.5
30 Номинальный ток двигателя 10 А, противоЭДС двигателя при номинальной скорости вращения 99 В, сопротивления цепи якоря 0,1 Ом. Определите пусковой ток двигателя ( $n = 0$ )?	2) 110 А; 2) 100 А; 3) 1000 А	103 87 7	1.6
31 В каком случае направление вращения двигателя не изменится?	3) при изменении направления тока якоря; 2) при изменении направления тока возбуждения; 3) при одновременном изменении направления тока якоря и тока возбуждения	63 94 14	1.6
32 Как изменились потери на вихревые токи в стали якоря, если частота вращения двигателя увеличилась в 2 раза?	1) увеличились в 2 раза; 2) увеличились в 4 раза; 3) не изменились	35 28 76	1.7
33 Как влияет напряжение на якоре двигателя на магнитные потери?	1) магнитные потери увеличиваются; 2) магнитные потери не изменяются	78 39	1.7

## 2 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 2.1 Применение, классификация и устройство синхронных машин

**Синхронные машины (СМ)** – это машины переменного тока, у которых в некотором диапазоне нагрузок частота вращения ротора остается неизменной и равной частоте вращения магнитного поля статора  $n = 60f/p$ , где  $f$  – частота переменного тока,  $p$  – число пар полюсов. СМ, как и все электрические машины, обратимы, т. е. они могут работать как генераторами, так и двигателями.

Синхронные машины широко применяются в народном хозяйстве как электрические генераторы и двигатели преимущественно большой мощности. На современных электростанциях электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами (СГ), которые обычно соединяются с приводными двигателями без промежуточных редукторов. Приводными двигателями для мощных синхронных генераторов служат гидротурбины, паровые и газовые турбины и относительно редко – двигатели внутреннего сгорания. СГ также служат источниками автономного электропитания на транспорте, в передвижных электростанциях.

Синхронные двигатели (СД) применяются там, где требуется постоянная частота вращения. Мощные синхронные двигатели используются в качестве электроприводов на металлургических заводах, холодильных и компрессорных установках, нефтеперекачивающих станциях магистральных трубопроводов, для привода некоторых станков, насосов вентиляторов и т. д.

Весьма ценным свойством СД является их способность работать при токе, опережающем по фазе питающее напряжение. Это свойство используется для увеличения коэффициента мощности сети ( $\cos\varphi$ ). Специальные СД, предназначенные для увеличения  $\cos\varphi$ , называются *синхронными компенсаторами*. Они устанавливаются на крупных промышленных предприятиях и на трансформаторных подстанциях энергосистемы.

По назначению СМ можно разделить на генераторы, двигатели и специальные машины.

Синхронная машина состоит из неподвижной части – статора, и вращающейся части – ротора, которая представляет собой электромагнит. В обмотки возбуждения ротора через щетки и кольца подается постоянный ток от возбудителя – машины постоянного тока или выпрямителя.

Якорем называется часть электрической машины, в которой индуцируется ЭДС (в СМ якорь чаще всего располагается на статоре). Устройство статора СМ принципиально не отличается от устройства статора асинхронной машины; существенные отличия имеются только в машинах большой мощности. Статор СМ (рисунок 2.1) состоит из чугунной станины – корпуса, внутри которого находится сердечник статора, собранный из отдельных, изолированных между собой листов электротехнической стали. В пазы сердечника укладывают обмотку статора из медного изолированного провода.

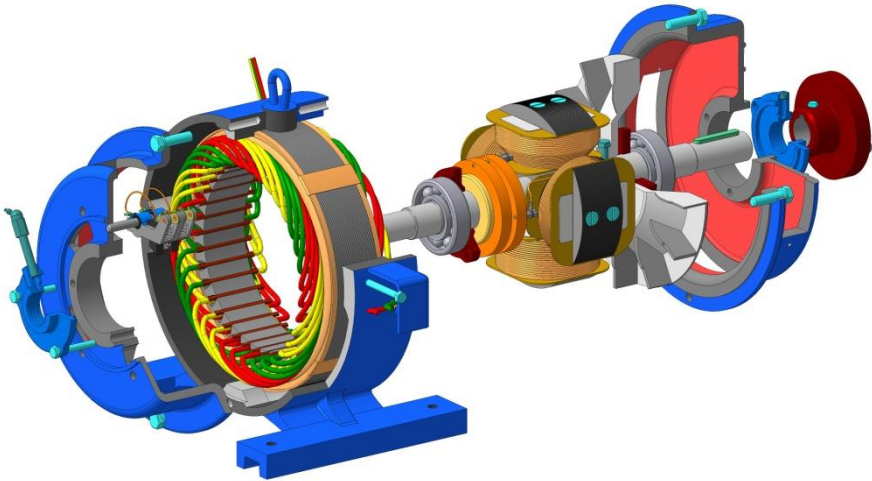


Рисунок 2.1 – Синхронная машина

По способу возбуждения различают СМ с электромагнитным и магнитоэлектрическим (используются постоянные магниты) возбуждением.

По конструкции ротора существуют СМ с явнополюсным и неявнополюсным ротором. Конструкции различных роторов представлены на рисунке 2.2. *Явнополюсный* ротор, имеющий выступающие полюсы, применяется для тихоходных машин с частотами вращения значительно меньше 1000 об/мин. Для быстроходных мощных машин с частотами 1500 –

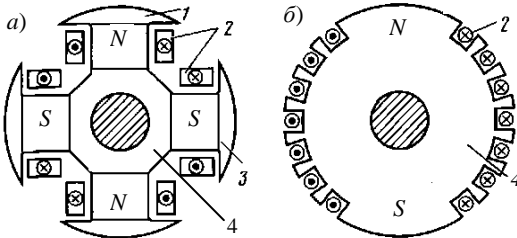


Рисунок 2.2 – Конструкции явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины:

1 – полюсный наконечник; 2 – виток обмотки возбуждения; 3 – сердечник полюса; 4 – сердечник ротора

3000 об/мин явнополюсный ротор конструктивно невыполним из-за сложности надежного крепления полюсов при больших центробежных силах. Поэтому для быстроходных машин применяется *неявнополюсный* ротор, имеющий вид цилиндра без выступающих полюсов.

При *электромагнитном возбуждении* ротор представляет собой электромагнит, обмотка которого питается постоянным током через два изолированных контактных кольца, укрепленных на валу машины и вращающихся вместе с ротором. Этот ток подводится к ротору извне от дополнительного генератора постоянного тока небольшой мощности (возбудителя, рисунок 2.3 [9]). Питание цепи возбуждения также можно осуществить от промышленной сети, используя управляемый

тиристорный выпрямитель. В последние годы выпускаются синхронные машины с бесщеточным возбуждением. Обмотка ротора таких машин питается от выпрямителя, вращающегося вместе с ротором. Выпрямитель, в свою очередь, получает питание от возбудителя, в качестве которого выступает синхронный генератор небольшой мощности с якорем, размещенным на роторе, вал которого является продолжением вала основного генератора. Наведенная во вращающемся якоре ЭДС, по проводникам, проложенным внутри полого вала ротора, подается на выпрямитель и далее на обмотку возбуждения основного генератора.

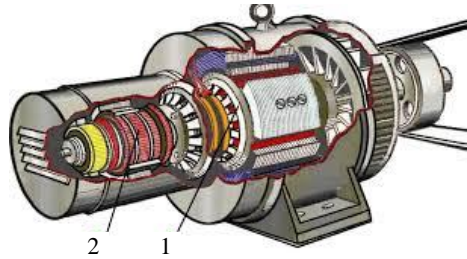


Рисунок 2.3 – Расположение возбудителя (2) и генератора (1) в синхронной машине

Сердечники полюсов большей частью изготовляют из литой стали, а обмотку полюсов – из медных изолированных проводов. Для создания синусоидально изменяющейся ЭДС необходимо получить синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Это достигается неравномерностью воздушного зазора между наконечником полюса и сталью магнитопровода статора: по краям полюсов воздушный зазор больше, чем под серединой полюса.

## 2.2 Обмотки машин переменного тока

### 2.2.1 Основные элементы и определения

В машинах малой мощности применяют полузакрытую форму паза (рисунок 2.4, а), а у машин большей мощности – открытую (рисунок 2.4, б).

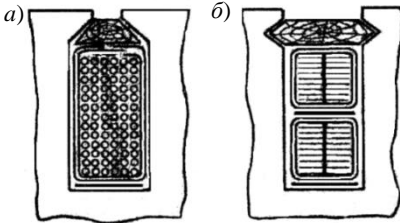


Рисунок 2.4 – Формы пазов: а – полузакрытый; б – открытый

Обмотки статора трехфазного синхронного генератора характеризуются следующими параметрами:  $z$  – число пазов в стали статора;  $m$  – число фаз пазов статора;  $p$  – число пар полюсов;  $q$  – число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm}. \quad (2.1)$$

Расстояние между сердечниками полюсов

$$\tau = z / 2p.$$

Фазовый шаг  $\gamma_\phi$ , показывающий расстояние между началами фаз:

$$\gamma_\phi = \frac{2}{3} \tau. \quad (2.2)$$



$y_\phi$  выражают обычно в долях полюсного деления или числом промежутков между пазами:

$$\alpha = \frac{360p}{z}, \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – угол между пазами в электрических градусах.

Различают углы в геометрических и электрических градусах. В общем случае один геометрический градус соответствует  $p$  электрических градусов.

Полюсное деления  $\tau$  всегда равно 180 электрическим градусам, поэтому фазовый шаг обмотки  $y_\phi = 2/3\tau = (2/3) \cdot 180 = 120$  электрическим градусам.

### 2.2.2 ЭДС витка обмотки статора синхронного генератора

При вращении ротора, по обмоткам которого протекает электрический ток, магнитные силовые линии пересекают провода обмотки статора, и в них индуцируется ЭДС переменного тока, среднее значение которой в одном проводнике может быть определено по формуле

$$E_{\text{пр.ср}} = B_{\text{ср}}lv,$$

где  $B_{\text{ср}}$  – среднее значение магнитной индукции в магнитном зазоре;

$l$  – активная длина проводника обмотки статора (часть проводника, находящаяся в зоне действия магнитного поля);

$v$  – скорость движения проводника.

Выразим линейную скорость  $v$  через число оборотов в минуту  $n$  и диаметр ротора  $D$ :

$$v = \frac{\pi Dn}{60}.$$

Согласно формуле для длины окружности ротора  $\pi D = 2p\tau$  получим

$$v = \frac{2p\tau n}{60}.$$

Частота тока обмотки статора зависит от числа оборотов в минуту вращающегося магнитного потока  $f = \frac{pn}{60}$ , значит  $v = 2\tau f$ . Подставляя выражение линейной скорости в формулу для  $E_{\text{пр}}$ , получим  $E_{\text{пр}} = B_{\text{ср}}l2\tau f$ . Выразим магнитный поток полюса через  $\Phi = B_{\text{ср}}l\tau$ , тогда ЭДС проводника  $E_{\text{пр}} = 2f\Phi$ . Для витка, состоящего из двух проводников,  $2E_{\text{пр}} = 4f\Phi$ .

Среднее и действующее значение синусоидальной ЭДС связаны между собой коэффициентом формы, равным 1,11. Тогда действующее значение ЭДС витка

$$E_{\text{витка}} = 1,11 E_{\text{витка ср}} = 4,44f\Phi.$$

### 2.2.3 Однофазные однослойные обмотки

Рассмотрим **сосредоточенную обмотку**. Для этой обмотки  $q = 1$ ;  $y = \tau$ . В такой обмотке витки катушки под одной парой полюсов помещены в двух пазах, один из которых находится под северным полюсом, а другой – под южным. Общий вид сосредоточенной обмотки при числе полюсов  $2p = 4$  и с последовательным соединением катушек показан на рисунке 2.5, а, а при параллельном – на рисунке 2.5, б.

Формула ЭДС для сосредоточенной обмотки имеет следующий вид:

$$E_{\text{соср}} = E_{\text{витка}} w = 4,44 w f \Phi, \quad (2.4)$$

где  $w$  – число последовательно соединенных витков обмотки.

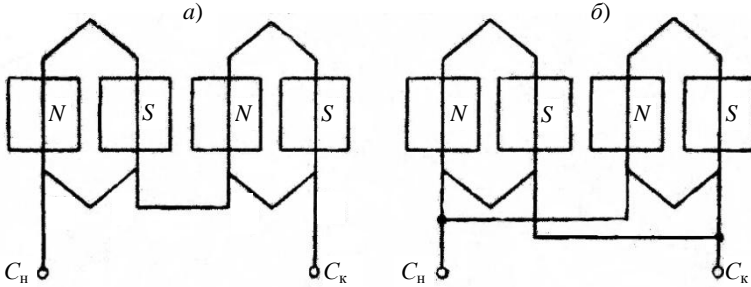


Рисунок 2.5 – Сосредоточенная однофазная однослойная обмотка:

а – последовательное соединение катушек; б – параллельное соединение катушек

Однако сосредоточенную обмотку не выполняют, так как это не позволяет полностью использовать сталь машины и увеличивает ее размеры. В действительности обмотку распределяют равномерно по пазам, выполненным в стальном сердечнике статора. Такую обмотку называют **распределенной**. Для нее  $q = 2, 3, 4$  и т. д.

В распределенной обмотке пазы сдвинуты относительно друг друга на угол  $\alpha$ , на такой же угол будут сдвинуты векторы ЭДС, которые индуктируются в катушках, расположенных в этих пазах.

Результирующая ЭДС группы катушек с  $q = 4$  равна векторной сумме ЭДС  $E_k$  отдельных катушек (рисунок 2.6, а):

$$\bar{E}_{\text{распр}} = \bar{E}_{k1} + \bar{E}_{k2} + \bar{E}_{k3} + \bar{E}_{k4}. \quad (2.5)$$

В сосредоточенной обмотке суммарная ЭДС группы катушек, размещенных в одном пазу под полюсом, равна алгебраической сумме ЭДС катушек (рисунок 2.6, б):

$$E_{\text{соср}} = E_{k1} + E_{k2} + E_{k3} + E_{k4} = qE_k.$$

Отношение ЭДС распределенной обмотки к ЭДС сосредоточенной обмотки называют **коэффициентом распределения**:

$$k_p = E_{\text{соср}} = E_{\text{распр}} / (qE_k).$$

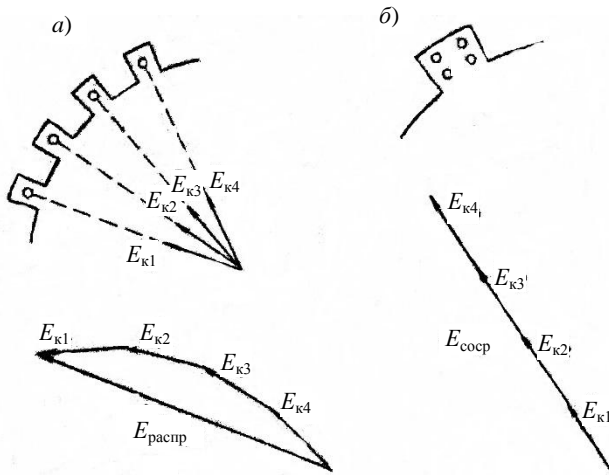


Рисунок 2.6 – ЭДС обмоток:  
 а – распределенной; б – сосредоточенной

Практически коэффициент распределения определяют по формуле для ЭДС первой гармоники:

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (2.6)$$

**Пример 2.1.** Найти коэффициент распределения обмотки, если  $q = 4$  и  $\alpha = 15^\circ$ .

*Решение.* Коэффициент распределения обмотки

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \cdot 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{15^\circ}{2}} \approx 0,96.$$

Поскольку коэффициент распределения меньше единицы, то ЭДС в фазе распределенной обмотки будет меньше, чем в сосредоточенной. Это уменьшение величины ЭДС отражает коэффициент распределения  $k_p$ , который необходимо ввести в формулу ЭДС обмотки:

$$E_{расп} = 4,44 k_p w f \Phi. \quad (2.7)$$

**Пример 2.2.** Выполнить однофазную распределенную обмотку со следующими данными:  $q = 4$ ;  $2p = 4$ ;  $z = 24$ ;  $y = \tau$ .

*Решение.* Шаг обмотки

$$y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

Выполняем обмотку с паза 1. Для определения номера паза, в который следует уложить конец первой секции, к номеру паза, где находится начало секции, прибавляем  $y$ :  $1 + y = 1 + 6 = 7$ .

Так как  $q = 4$ , то аналогично укладываем еще три секции в пазы 2–8; 3–9 и 4–10 (рисунок 2.7, *a*).

После намотки группы катушек под одной парой полюсов определяем начало второй группы катушек под второй парой полюсов. Для этого к номеру паза, в котором лежит начало первой секции, прибавляем  $2\tau$ :

$$1 + 2\tau = 1 + 2 \cdot 6 = 13.$$

Вторую группу катушек укладываем так же, как и первую.

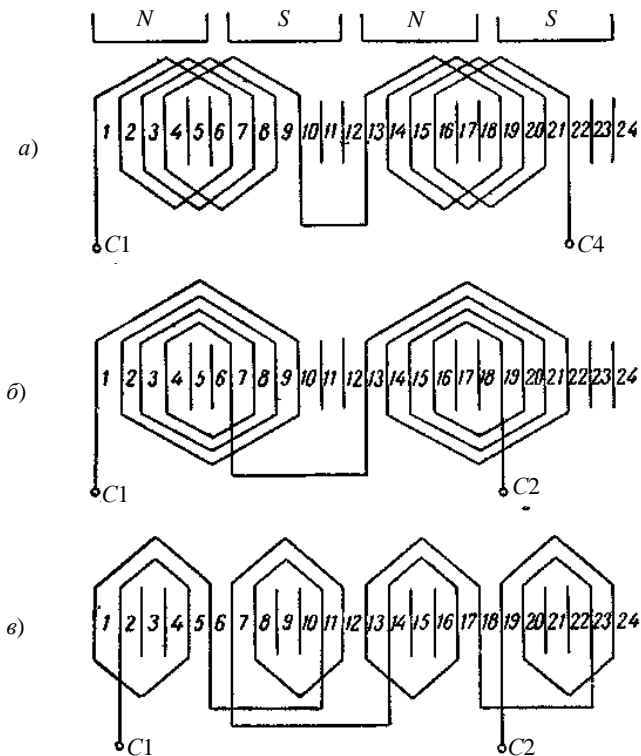


Рисунок 2.7 – Однофазная распределенная обмотка:

*a* – с перекрещиванием лобовых соединений; *b* – без перекрещивания лобовых соединений; *в* – с укорочением лобовых соединений

В данной обмотке перекрещиваются лобовые соединения, что создает неудобство при ее выполнении. Этот недостаток можно устранить, укладывая в пазы следующим образом: 1–10, 2–9, 3–8 и 4–7 (рисунок 2.7, *b*).

Обмотку можно выполнить несколько иначе, не укорачивая ее шага. Для этого две катушки наматывают в одном направлении, а две другие – в противоположном, соединяя катушки так, чтобы их ЭДС складывались (рисунок 2.7, *в*).

### 2.2.4 Трехфазные однослойные обмотки

Трехфазная обмотка статора составлена из трех однофазных обмоток, начала которых смещены на 120 электрических градусов, или  $2\pi/3$ .

В самом простом случае для выполнения трехфазной обмотки нужно иметь три катушки на каждую пару полюсов.

**Пример 2.3.** Выполнить трехфазную сосредоточенную обмотку, имеющую следующие данные:  $q = 1; m = 3; 2p = 4; z = 12$ .

*Решение.* Рассчитаем обмотку:

$$y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{12}{4} = 3; \quad y_\phi = \frac{2}{3} \tau = \frac{2}{3} \cdot 3 = 2.$$

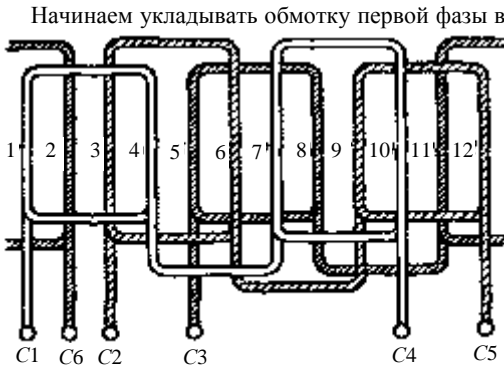


Рисунок 2.8 – Схема простейшей трехфазной однослойной обмотки статора

Начинаем укладывать обмотку первой фазы в первый паз и выполняем ее аналогично однофазной обмотке. Для определения номера паза, в которой нужно уложить начало обмотки второй фазы, к номеру паза, где лежит начало обмотки первой фазы, прибавляем  $y_\phi$ :

$$1 + y_\phi = 1 + 2 = 3.$$

Вторую и третью фазы выполняем аналогично первой (рисунок 2.8). Начала обмоток обозначаем буквами C1, C2 и C3, а концы – C4, C5 и C6.

На рисунке 2.8 показана простая трехфазная однослойная сосредоточенная обмотка.

Вследствие укорочения шага обмотки величина ЭДС обмотки уменьшается, так как при укороченном шаге одна активная сторона катушки находится в магнитном поле с меньшим значением магнитной индукции  $B$ , а противоположная сторона находится в магнитном поле с максимальным значением индукции  $B_{\max}$  (рисунок 2.9). Число, показывающее уменьшение ЭДС обмотки из-за укорочения шага, называют коэффициентом укорочения  $k_y$ .

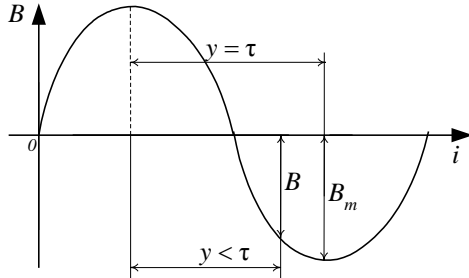


Рисунок 2.9 – Уменьшение ЭДС обмотки, вследствие укорочения шага

Произведение коэффициента распределения на коэффициент укорочения называют обмоточным коэффициентом:

$$k_{об} = k_y k_p. \quad (2.8)$$

Значение обмоточного коэффициента находится в пределах 0,90–0,95.

Формула фазной ЭДС обмотки с учётом обмоточного коэффициента примет вид

$$E_{\phi} = 4,44 k_{об} w f \Phi. \quad (2.9)$$

Высшие гармоники появляются в результате несинусоидального распределения МДС, наличия пазов на статоре и роторе, насыщения стали, а также других причин. Магнитное поле высших гармоник вращается с угловой частотой  $\omega_v$ , которая в  $v$  раз (порядок гармоники  $v = 3, 5, 7, \dots$ ) больше частоты первой гармоники.

Высшие гармоники являются причиной шумов и вибраций в электрических машинах, поэтому принимаются меры к подавлению высших гармоник. Первой из таких мер является улучшение формы кривой распределения самого поля. Однако получить строго синусоидальное поле не удается. В связи с этим для улучшения формы ЭДС используют укорочение шага обмотки, распределение обмотки и скос пазов.

Если ЭДС обмотки содержит высшие гармоники ( $E_{\phi 1}, E_{\phi 3}, E_{\phi 5}, \dots$ ), то действующее значение рассчитывается по формуле

$$E_{\phi} = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 3}^2 + E_{\phi 5}^2 + \dots}$$

причем каждому порядку  $v$  гармоники и углу укорочения  $\gamma$  соответствуют коэффициенты укорочения и распределения, оцениваемые выражениями

$$k_y = \frac{\cos \gamma v}{2}; \quad k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha v}{2}}{q \sin \frac{\alpha v}{2}}.$$

Последние соотношения указывают на то, что амплитуда ЭДС высших гармоник ( $E_{\phi 3}, E_{\phi 5}, E_{\phi 7}, \dots$ ) намного меньше амплитуды первой (основной) гармоники  $E_{\phi 1}$ .

Укорочение шага обмотки позволяет подавить любую гармонику ЭДС. Если принять укорочение шага  $\frac{1}{5} \tau$ , т. е.  $y = \frac{4}{5} \tau$ , то в фазной ЭДС будет отсутствовать пятая гармоника. В этом случае пятые гармоники ЭДС в активных сторонах катушки направлены встречно и взаимно уничтожаются. Укорочением шага на  $\frac{1}{7} \tau$  наиболее ослабляется в ЭДС седьмая гармоника и т.д.

Гармоники ЭДС, кратные трем, в трехфазной обмотке совпадают по фазе, поэтому при соединении обмотки в звезду в линейных напряжениях эти гармоники отсутствуют. При соединении обмотки в треугольник линейное

напряжение равно фазному, но гармоник, кратных трем, в них также не будет. Это связано с тем, что ЭДС третьих гармоник, складываясь, вызывают ток в контуре треугольника. Падение напряжения от этого тока полностью компенсирует ЭДС третьей гармоники. Однако соединения обмотки в треугольник стараются избежать, так как возникающие при этом токи вызывают дополнительные потери и нагрев обмотки.

**Пример 2.4.** Рассчитать и вычертить трехфазную двухслойную обмотку с укороченным шагом, для которой  $2p = 4$ ;  $z = 24$ ;  $y = \frac{5}{6}\tau$  (укорочение шага на  $\frac{1}{6}\tau$ ).

*Решение.* Число пазов на фазу

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2.$$

Для двухслойных обмоток число секций удваивается, поэтому оно будет равно 4.

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6; \quad y = \frac{5}{6}\tau = \frac{5}{6} \cdot 6 = 5; \quad y_{\phi} = \frac{2}{3}\tau = \frac{2}{3} \cdot 6 = 4.$$

Начало первой фазы укладываем в паз 1 (рисунок 2.10), а конец первой секции – в паз 6. Поскольку число секций равно 4, то под этой парой полюсов наматываем еще одну секцию 2–7. Чтобы определить начало следующей группы катушек к началу первой фазы прибавляем  $2\tau$ :  $1 + 2 \cdot 6 = 1 + 12 = 13$ . Если первая группа катушек намотана по направлению движения часовой стрелки, то вторую группу катушек наматывают уже против направления движения часовой стрелки. Если начало катушек лежит в пазу 13, то для определения конца секции от номера этого паза отнимают значение  $y$ :  $13 - 5 = 8$ : конец секции лежит в пазу 8. Так как число секций равно 4, то под этой парой полюсов наматывают ещё одну секцию 12–7.

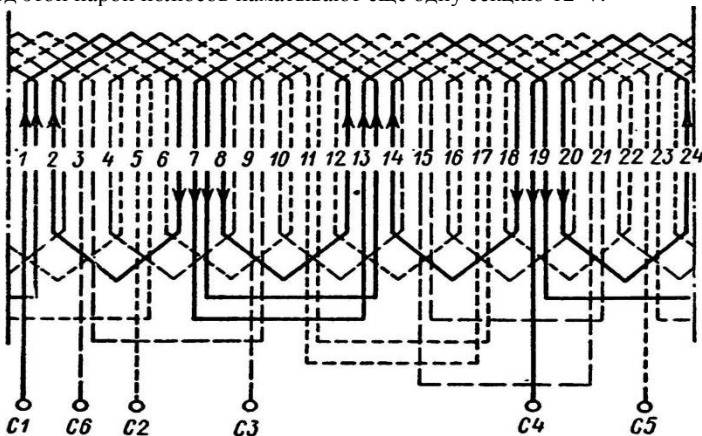


Рисунок 2.10 – Схема трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом

Для определения начала третьей группы катушек первой фазы под второй парой полюсов к концу второй группы катушек прибавляем значение  $\tau$ :  $7 + 6 = 13$ . Третью

группу катушек начинаем укладывать в паз 13. В дальнейшем обмотку выполняют аналогичным образом. Для определения начала второй фазы к началу первой фазы прибавляем значение  $y_b$ , получаем  $1 + y_b = 1 + 2 \cdot 6/3 = 5$ . Вторую фазу начинаем укладывать в паз 5 и наматываем подобно первой.

Составляем обмоточную таблицу:

Фаза А		Фаза В		Фаза С	
1–6;	2–7	5–10;	6–11	9–14;	10–15
13–8;	12–7	17–12;	16–11	21–16;	20–15
13–18;	14–19	17–22;	18–23	21–2;	22–3
1–20;	24 - 19	5–24;	4–23	9–4;	8–3

## 2.3 Синхронный генератор

### 2.3.1 Принцип действия синхронного генератора

Слово “синхронный” обозначает «одновременный». Это значит, что одновременно и в строгой математической зависимости с изменением частоты вращения ротора изменяется частота тока:

$$n = 60 f / p, \quad (2.10)$$

где  $n$  – частота вращения ротора;

$f$  – частота тока;

$p$  – число пар полюсов ротора.

Синхронные генераторы (СГ) трехфазного тока изготавливают на следующие номинальные напряжения: 230, 400, 690, 3150, 6300, 10500, 21000 В.

Работу синхронной машины рассмотрим на примере трехфазного СГ с явнополюсным ротором-магнитом (рисунок 2.11). Принцип действия СГ основан на двух законах электротехники: законе электромагнитной индукции и законе электромагнитных сил.

При холостом ходе ток якоря синхронной машины равен нулю. При вращении ротора приводным двигателем с моментом  $M_{вд}$  и частотой вращения  $n$  вместе с ним вращается и основной магнитный поток  $\Phi_0$ . Магнитный поток  $\Phi_0$  магнита идет по пути наименьшего магнитного сопротивления, замыкаясь по стали. Пересекая проводники каждой фазы статорной обмотки, магнитный поток индуцирует в них ЭДС. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. Действующее значение синусоидальной ЭДС  $E_0$ , индуцируемая при холостом ходе в одной фазе статора, равна

$$E_0 = 4,44 k_{об} w f \Phi_0, \quad (2.11)$$

где  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент;

$w$  – число витков одной фазы статора, включенных последовательно;

$\Phi_0$  – магнитный поток полюса ротора при токе возбуждения  $I_b$ .

При вращении ротора частота ЭДС, индуцируемой в статорной обмотке, определяется выражением

$$f = pn / 60. \quad (2.12)$$



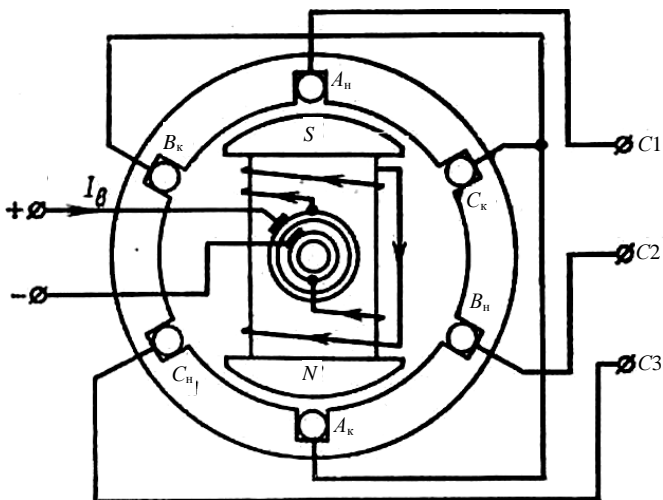


Рисунок 2.11 – Конструктивная схема трехфазного синхронного генератора

Магнитный поток статора, который называется потоком якоря, вращается в ту же сторону и с той же частотой, что и ротор. Следовательно, вращающееся поле статора неподвижно относительно ротора. Магнитный поток статора имеет две составляющие – основное магнитный поток якоря  $\Phi_a$  и магнитный поток рассеяния  $\Phi_\sigma$ , силовые линии которого замыкаются вокруг проводов обмотки якоря и в ротор не проходят.

При вращении ротора ЭДС трех обмоток статора будут образовывать симметричную трехфазную систему:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t ; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) . \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Присоединим к статорной обмотке трехфазную нагрузку. По фазам генератора и нагрузки потечет переменный ток. Сдвиг тока относительно ЭДС определяется характером нагрузки. При активной нагрузке ток в фазе совпадает с ЭДС, при активно-индуктивной – отстает от ЭДС, при активно-емкостной – опережает ЭДС.

Для активной нагрузки токи в фазах, т. е. обмотках статора, совпадают по направлению с ЭДС. В этом случае имеем симметричную трехфазную систему токов:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t ; \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) . \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

По закону электромагнитных сил на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила. Направление этой силы определяется по правилу левой руки. Со стороны статора на ротор будет действовать такая же сила, но обратного направления, т. к. в этом случае будет соблюдаться равновесие сил.

Электромагнитная сила, действующая на ротор, создает электромагнитный момент, направленный против вращения ротора. Значит, электромагнитный момент в СГ является тормозным. Он тем больше, чем больше отбирается ток или электрическая мощность от генератора.

Под действием электромагнитного тормозного момента частота вращения ротора, а следовательно, и частота ЭДС, вырабатываемой генератором, начинает снижаться. Если изменение частоты недопустимо, то с возрастанием нагрузки на генератор необходимо увеличивать вращающий момент, создаваемый приводным двигателем.

### 2.3.2 Реакция якоря синхронного генератора

При протекании по обмотке якоря тока нагрузки генератора создается собственное магнитное поле, которое воздействует на поле обмотки возбуждения. Влияние магнитного потока якоря  $\Phi_a$  на поле обмотки возбуждения  $\Phi_o$  называется **реакцией якоря**. Эти два потока вращаются с одинаковой частотой и создают результирующий вращающийся магнитный поток  $\Phi_{рез}$ .

Под воздействием потока  $\Phi_a$  результирующий поток  $\Phi_{рез}$  смещается относительно потока на угол  $\theta$  в сторону отставания. Этот угол называют *углом рассогласования* (рисунок 2.12).

Ведущим звеном при электромагнитном преобразовании энергии является ротор, т. е. полюс ротора идет впереди полюса результирующего магнитного потока СГ. При холостом ходе  $\theta = 0$ . При увеличении нагрузки растет электромагнитная сила, следовательно, растет и угол рассогласования  $\theta$ , но до некоторого предела, ограниченного мощностью приводного двигателя.

При чисто *активной нагрузке* реакция якоря поперечная, потому что магнитные линии потока  $\Phi_a$  якоря перпендикулярны магнитным линиям потока ротора  $\Phi_o$  (рисунок 2.13, а).

При *индуктивной нагрузке* ток  $I$  отстает от ЭДС на  $90^\circ$ , и реакция якоря

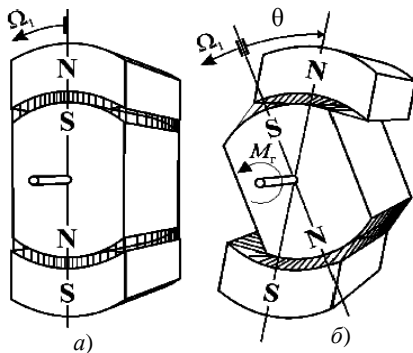


Рисунок 2.12 –  
Пространственный угол  $\theta$ :  
а – при холостом ходе; б – при нагрузке

будет продольной размагничивающей (рисунок 2.13, б), т. к.  $\Phi_a$  противоположен направлению основного потока ротора  $\Phi_0$ .

При *емкостной нагрузке* реакция якоря продольная подмагничивающая (рисунок 2.13, в), т. к.  $\Phi_a$  совпадает по направлению с основным потоком ротора  $\Phi_0$ .

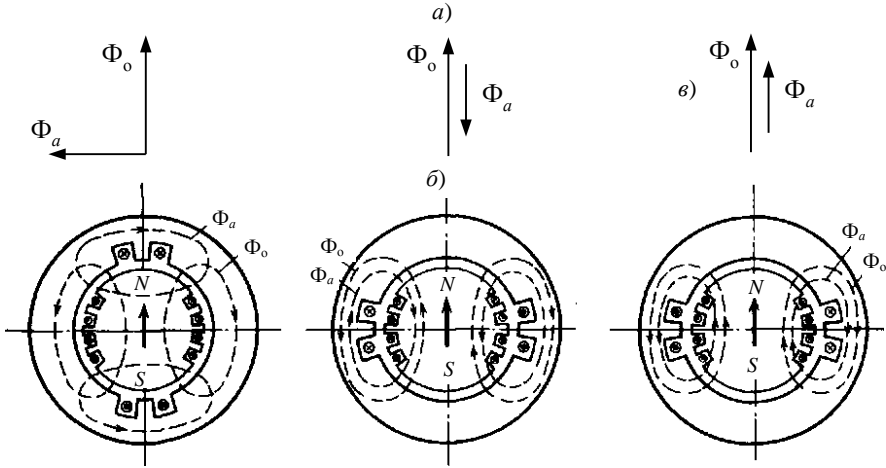


Рисунок 2.13 – Поперечная (а), продольная размагничивающая (б) и продольная намагничивающая (в) реакция якоря синхронной машины

В действительности на электростанциях имеет место смешанная, активно-индуктивная нагрузка, т. е. ток генератора включает в себя активную и индуктивную составляющие. Чем меньше составляющая активного тока, тем ниже значение коэффициента мощности.

Синхронные генераторы предназначены для работы в сети с коэффициентом мощности  $\cos\phi = 0,8$ . Более низкое значение коэффициента мощности в сети свидетельствует об увеличении реактивной составляющей тока нагрузки, что приводит к усилению размагничивающего действия реакции якоря и снижению напряжения на зажимах генератора. Для того чтобы скомпенсировать размагничивающее действие реакции якоря при увеличении индуктивной нагрузки, нужно увеличить ток возбуждения в обмотке ротора. Этот ток может достигать значения, превышающего номинальное при номинальной нагрузке генератора, что приводит к перегреву обмотки ротора генератора.

При низком коэффициенте мощности напряжение генератора будет неустойчиво, а при больших толчках индуктивной нагрузки, что бывает при пуске мощных двигателей, напряжение генератора может упасть до нуля.

### 2.3.3 Характеристики синхронного генератора

Характеристика холостого хода СГ представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода от тока в обмотке возбуждения  $I_B$ . Согласно формулам (2.11) и (2.12) ЭДС якоря при неизменной частоте  $n = \text{const}$  пропорциональна потоку, поэтому зависимость  $E_0$  от  $I_B$ , т. е. *характеристика холостого хода* (рисунок 2.14) синхронного генератора, подобна зависимости магнитного потока от тока возбуждения.

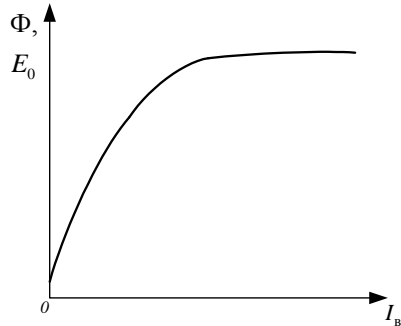


Рисунок 2.14 – Характеристика холостого хода СГ

Прямолинейная часть характеристики указывает на пропорциональность между индуцированной ЭДС и током возбуждения. В дальнейшем магнитная система генератора насыщается и кривая изгибается. Обычно нормальная работа машины имеет место за изгибом характеристики холостого хода.

*Внешняя характеристика* СГ определяет зависимость  $U = f(I)$  при  $I_B = \text{const}$ ,  $\cos\varphi = \text{const}$ ,  $f = f_n$  и показывает, как изменяется напряжение на зажимах генератора  $U$  при изменении нагрузки и неизменном токе возбуждения. Вид внешних характеристик при разных характерах нагрузки показан на рисунке 2.16, причем предполагается, что в каждом случае ток возбуждения отрегулирован так, что  $I = I_n$  и  $U = U_n$ .



Рисунок 2.15 – Внешние характеристики СГ

Вид внешних характеристик СГ объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе (кривая 1 на рисунке 2.15) существует значительная продольная размагничивающая реакция якоря, которая растет с увеличением тока нагрузки  $I$ , и поэтому напряжение  $U$  с увеличением тока  $I$  уменьшается. При чисто активной нагрузке (кривая 2 на рисунке 2.15) также имеется продольная размагничивающая реакция якоря, но угол  $\psi$  между  $E$  и  $I$  меньше, чем в предыдущем случае, поэтому продольная размагничивающая реакция якоря слабее, и уменьшение  $U$  с увеличением  $I$  происходит медленнее. При опережающем токе (кривая 3 на рисунке 2.15) возникает продольная намагничивающая реакция якоря, кото-

рая увеличивает результирующий магнитный поток машины. Поэтому с увеличением тока нагрузки  $I$  напряжение  $U$  на зажимах генератора возрастает.

Номинальное изменение напряжения синхронного генератора  $\Delta U_n$  – это изменение напряжения на его зажимах при изменении нагрузки от нуля до номинального значения  $U_n$  при неизменном токе возбуждения.

Синхронные генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальной нагрузкой при отстающем токе и  $\cos \varphi = 0,8$ .

*Регулировочная характеристика* определяет зависимость  $I_B = f(I)$  при  $U = U_n = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и показывает, как нужно регулировать ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным (рисунок 2.16).

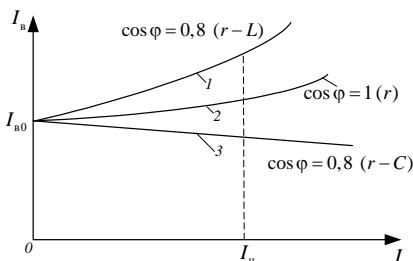


Рисунок 2.16 – Регулировочные характеристики синхронных генераторов

Вид регулировочных характеристик также объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе (кривая 1 на рисунке 2.16) продольная реакция якоря является размагничивающей и для компенсации ее влияния на величины  $\Phi_0$  и  $U$  с увеличением  $I$  необходимо значительно увеличивать ток возбуждения  $I_B$ . При чисто активной нагрузке (кривая 2 на рисунке 2.16) размагничивающая реакция якоря слабее и требуется меньшее увеличение  $I_B$ . При опережающем токе (кривая 3 на рисунке 2.16) продольная реакция якоря стремится увеличивать  $\Phi_0$  и  $U$ , вследствие чего для сохранения  $U = \text{const}$  необходимо с увеличением  $I$  уменьшать  $I_B$ . Обычно  $\cos \varphi = 0,8 (r - L)$ , и поэтому при переходе от холостого к номинальной нагрузке необходимо увеличить ток возбуждения.

### 2.3.4 Параллельная работа синхронных генераторов с сетью

**Условия включения на параллельную работу синхронных генераторов.** На электрических станциях обычно устанавливают несколько генераторов, которые отдают электрическую энергию на общие шины, т. е. работают параллельно. Если станция оборудована одним генератором, то его нагрузка сильно колеблется в зависимости от времени года и от времени суток. Замена одного генератора несколькими дает возможность при необходимости часть генераторов останавливать, экономя тем самым расход топлива, воды и т. д. Для надежного снабжения потребителей на случай аварии станция должна иметь резервный генератор. Наконец, параллельная работа генераторов и станций диктуется необходимостью объединения в общую энергосистему нескольких электростанций, что позволяет наиболее

рационально загружать станции в течение года и бесперебойно снабжать потребителей электроэнергией.

Для включения синхронных трехфазных генераторов на параллельную работу необходимо выполнить следующие условия:

1) равенство действующих значений напряжения сети  $U_c$  и напряжения (ЭДС) на зажимах генератора  $U_g$  включаемого в сеть;

2) напряжения сети  $U_c$  и генератора  $U_g$  в момент включения должны совпадать по фазе;

3) равенство частот генератора  $f_g$  и сети  $f_c$  которое достигается регулированием частоты вращения;

4) одинаковая последовательность чередования фаз сети и генератора.

То есть при подключении генератора к сети мгновенные значения напряжения (ЭДС) генератора должны соответствовать мгновенным значениям напряжения одноименных фаз сети.

При указанных условиях векторы напряжений генератора и сети совпадают и вращаются с одинаковой частотой (рисунок 2.17).

Разность напряжений сети и генератора одноименных фаз

$$\underline{U}_{cA} - \underline{U}_{gA} = \underline{U}_{cB} - \underline{U}_{gB} = \underline{U}_{cC} - \underline{U}_{gC} = 0.$$

Рассмотрим, какие явления возникают в генераторах при несоблюдении этих условий.

Если действующее значение напряжения сети  $U_c$  не равно напряжению (ЭДС) на зажимах генератора  $U_g$ , включаемого в сеть, а остальные условия выдержаны, то в обмотке генератора возникает уравнильный ток  $I_{ур}$ . Значение этого тока можно определить из выражения

$$I_{ур} = \frac{E_0 - U_c}{jx_c},$$

где  $E_0$  – ЭДС подключаемого СГ;

$U_c$  – напряжение сети;

$x_c$  – внутреннее индуктивное (синхронное) сопротивление СГ.

Так как активное сопротивление обмоток генератора очень мало, то можно считать, что обмотки генератора обладают только индуктивным сопротивлением. Вследствие этого уравнильный ток в данном случае будет реактивным током. Уравнильный ток дополнительно нагружает обмотку якоря генератора, что не дает снимать с генератора номинальную мощность.

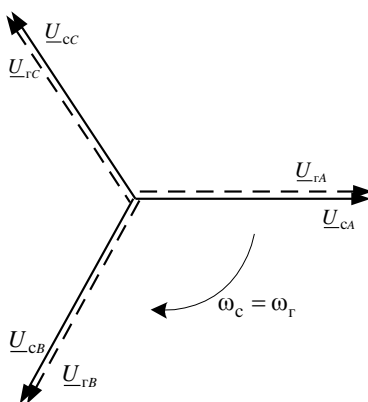


Рисунок 2.17 – Временные диаграммы напряжения сети и генератора при идеальных условиях включения на параллельную работу

Неправильная синхронизация может вызвать серьезную аварию. Если, например, напряжения  $U_c$  и  $U_r$  будут в момент включения генератора в сеть сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ , то это эквивалентно короткому замыканию при удвоенном напряжении. Зарегистрировано немало случаев, когда неправильная синхронизация вызывала серьезные повреждения оборудования: повреждение обмоток, поломка крепежных деталей сердечников и полюсов, поломка вала, разрушение всего генератора.

**Способы включения синхронных генераторов на параллельную работу.** Из вышесказанного становится понятным, что для безаварийного подключения синхронного генератора на параллельную работу с сетью необходимо соблюсти ряд условий. На практике выполнение этих условий можно контролировать при помощи специальных синхронизирующих схем.

**Точная синхронизация.** Она может быть реализована путем включения между одноименными фазами генератора и сети ламп, рассчитанных на двойное фазное напряжение (рисунок 2.18, а). В такой схеме лампы находятся под действием разности фазных напряжений  $\Delta U$  генератора и сети. При точной синхронизации, когда  $\Delta U$  всех фаз равны нулю, все лампы погаснут (схема на погасание). Для более точной фиксации нулевого значения  $\Delta U$  параллельно одной из ламп включается вольтметр, имеющий повышенную чувствительность на начальном участке шкалы. Если при этой схеме включения лампы будут гаснуть не одновременно, а по очереди, то это свидетельствует о том, что порядок чередования фаз неодинаков.

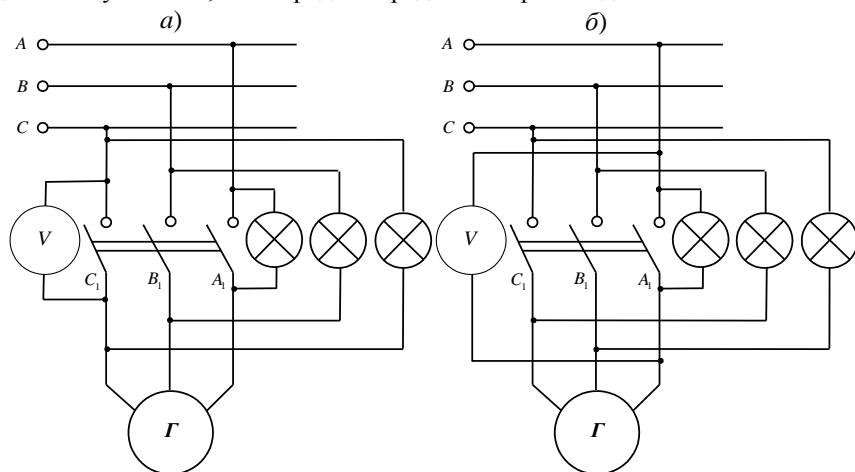


Рисунок 2.18 – Схема подключения синхронного генератора с помощью ламп:  
а – на погасание; б – на вращение света

Включать генератор на параллельную работу с сетью нужно при наименьшей частоте погасания ламп, когда лампы погаснут, а стрелка вольтметра подойдет к нулю.

Чаще для синхронизации применяют схему включения ламп «на вращение света» (рисунок 2.18, б). В этом случае одну лампу присоединяют к одноименным фазам генератора и сети, а две другие – к разноименным. Параллельно к лампе, присоединенной к одноименным фазам, включают нулевой вольтметр.

Генератор включают на параллельную работу в тот момент, когда вращение света прекратится, лампа, присоединенная к одноименным фазам, погаснет, стрелка нулевого вольтметра подходит к нулю, а две другие лампы горят одинаковым светом.

Нулевой вольтметр ставят для того, чтобы точнее определить разность напряжений между генератором и сетью, чего с помощью одних ламп сделать нельзя, так как при 15–20 % номинального напряжения на лампах их нити не накаливаются. Кроме ламповых, существуют также стрелочные синхроскопы.

Самосинхронизация – более простой способ синхронизации генератора, позволяющий включить генератор на параллельную работу за короткое время даже при значительных колебаниях напряжения в сети. Сущность способа самосинхронизации состоит в том, что невозбужденный генератор, приводимый во вращении первичным двигателем с частотой, которая может отличаться на 2–5 % от номинальной, включают в сеть, после чего в обмотку ротора падают возбуждение, и генератор втягивается в синхронизм благодаря действию электромагнитного моментов.

При включении генератора в сеть его обмотка возбуждения должна быть замкнута на сопротивление (во избежание перенапряжения в обмотке ротора). Во время включения наблюдаются броски тока статора, в несколько раз превышающие номинальный; метод самосинхронизации можно применять тогда, когда их величина не превышает  $3,5I_n$ .

Важным условием успешной самосинхронизации является отсутствие избыточного момента на валу приводного двигателя. В противном случае ускорение ротора может стать значительным, в результате чего самосинхронизация затянется.

Частоту вращения генератора, включаемого в сеть без возбуждения, можно определить частотным реле или тахометром.

Перед самосинхронизацией необходимо при помощи *фазоуказателя* убедиться, что порядок чередования фаз обоих генераторов одинаков. В конце синхронизации значение ЭДС подключаемого генератора  $E_0$  равно напряжению сети  $U_c$ , а ее частота равна частоте сети, и в дальнейшем эта частота неизменна. Так как уравнивающий ток в конце синхронизации равен нулю ( $E_0 = U_c$ ), то генератор будет работать в режиме холостого хода.



### 2.3.5 Регулирование активной и реактивной мощности синхронных генераторов

Изменение тока возбуждения  $I_B$  генератора, работающего автономно, имеет следствием изменение магнитного потока, ЭДС и напряжения. Напряжение на зажимах генератора, работающего параллельно с сетью, не может изменяться при изменении  $I_B$ .

Примем, что активная нагрузка генератора  $P = 3UI \cos \varphi$  постоянна. Таким образом, исходными условиями в наших дальнейших рассуждениях являются  $P = \text{const}$ ;  $U = \text{const}$ ;  $f = \text{const}$ .

При постоянном значении активной нагрузки неизменной будет и электромагнитная мощность генератора. Поэтому при изменении тока возбуждения  $I_B$  генератора будет меняться ЭДС и угол  $\theta$  так, как это показано на векторной диаграмме (рисунок 2.19). Так как треугольник напряжений  $\underline{E}$ ,  $\underline{U}$ ,  $\underline{U}_x$  остается замкнутым и, кроме того, новый вектор  $\underline{U}_x$  должен остаться перпендикулярным к вектору  $\underline{I}$ , то изменятся величина и положение на диаграмме этого вектора тока. При принятых выше условиях это будет иметь следствием изменение угла  $\varphi$ , то есть изменение реактивной мощности  $Q = 3UI \sin \varphi$  (активная мощность останется постоянной).

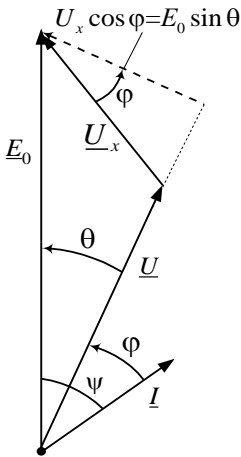


Рисунок 2.19 – Векторная диаграмма к определению момента

Следует помнить, что такое регулирование возможно только для генераторов, работающих параллельно с сетью. Для генератора, работающего автономно,  $\cos \varphi$  целиком определяется характером нагрузки и не может быть изменен произвольно.

Зависимости общего тока якоря генератора, работающего параллельно с мощной сетью, от тока возбуждения при постоянных частоте и напряжении сети и отдаваемой генератором на сеть активной мощности ( $P_2 = 0$ ,  $P_2 = 0,5P_n$  и  $P_2 = P_n$ ) изображены в виде U-образных кривых (рисунок 2.20). В правой части кривая имеет малый угол наклона к горизонтальной оси, что объясняется насыщением стали машины.

Зависимости общего тока якоря генератора,

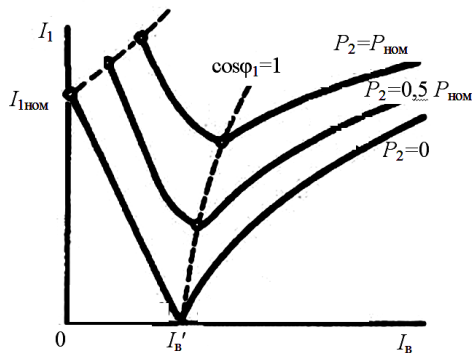


Рисунок 2.20 – U-образные кривые синхронного генератора

Пунктирная линия соответствует такому значению тока возбуждения, при котором ток якоря становится минимальным и равным только активной составляющей. В этом случае генератор работает при коэффициенте мощности  $\cos\varphi = 1$ . Отклонение этой пунктирной линии вправо указывает на то, что с возрастанием нагрузки ток возбуждения необходимо увеличивать для поддержания напряжения на зажимах генератора постоянным.

При перевозбуждении генератор будет работать с опережающим током по отношению к напряжению сети, а при уменьшении возбуждения – с отстающим. Таким образом, при изменении возбуждения генератора изменятся только его реактивная мощность.

Активную мощность СГ, работающего параллельно с мощной сетью, регулируют изменением питания приводного двигателя.

## 2.4 Синхронный двигатель и компенсатор

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем полюсов ротора. К статору синхронного двигателя подводят трехфазный переменный ток, а к обмотке возбуждения ротора – постоянный.

### 2.4.1 Момент синхронного двигателя

Электрическая мощность, подводимая к трехфазному синхронному двигателю при симметричной нагрузке,

$$P = 3IU \cos\varphi, \quad (2.15)$$

где  $U$  и  $I$  – действующие фазные напряжение и ток.

Механическая мощность, вырабатываемая двигателем,

$$P_{\text{мх}} = \omega_p M, \quad (2.16)$$

где  $\omega_p$  – угловая частота вращения ротора;

$M$  – момент сопротивления вращению ротора.

Пренебрегая потерями в машине и приравнивая электрическую и механическую мощности, получим выражение для момента

$$M = \frac{3UI \cos\varphi}{\omega_p}. \quad (2.17)$$

В двигательном режиме момент  $M$  является движущим, а в генераторном – тормозящим.

Из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 2.19, следует

$$U_x \cos\varphi = E_0 \sin\theta$$

или

$$I \cos\varphi = \frac{E_0 \sin\theta}{x_c}, \quad (2.18)$$

где  $U_x$  – суммарное индуктивное падение напряжения от потока рассеяния и потока реакции якоря,

$$U_x = Ix_c;$$

$x_c$  – синхронное индуктивное сопротивление статора.

Угловая частота вращения ротора

$$\omega_p = 2\pi n / 60 = 2\pi f / p = \omega / p, \quad (2.19)$$

где  $\omega$  – угловая частота тока.

Подставляя выражения (2.18) и (2.19) в уравнение (2.17), находим

$$M = \frac{3UE_0}{\omega_p x_c} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta. \quad (2.20)$$

Значит вращающий момент синхронной машины и ее мощность пропорциональны синусу угла рассогласования.

Представим себе магнитное поле статора в виде круга с явно выраженными полюсами на нем, вращающегося с частотой  $n$ . Эти полюса магнитными силовыми линиями связываются с полюсами ротора противоположной полярности.

Вращающееся магнитное поле увлекает за собой полюса ротора и заставляет их вращаться с такой же частотой. Частоты вращения ротора и вращающегося магнитного поля равны, поэтому ее называют синхронной. При нагрузке ротор синхронного двигателя отстает на некоторый угол от вращающегося магнитного поля, причем с увеличением нагрузки угол  $\theta$  увеличивается (рисунок 2.12).

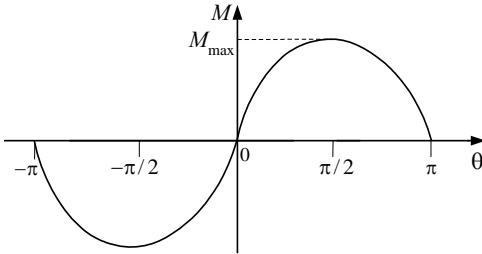


Рисунок 2.21 – Угловая характеристика синхронной машины

Изменение момента синхронной машины в зависимости от угла  $\theta$ , согласно формуле (2.20), называется *угловой характеристикой* (рисунок 2.21).

Физически она означает, что в двигателе, в отличие от генератора, полюсы ротора отстают от вращающегося магнитного поля (рисунок 2.12); теперь уже последнее «ведет» за собой ротор. Если момент нагрузки превысит  $M_{\max}$ , то поддержание синхронной частоты вращения ротора будет невозможно и машина выпадет из синхронизма. При номинальной мощности двигателя угол  $\theta = 20...30^\circ$ , при этом перегрузочная способность двигателя  $M_{\max}/M_H = 2...3$ .

Максимальный момент

$$M_{\max} = 3 \frac{p}{\omega_p} \frac{UE_0}{x_c} = 3 \frac{p}{\omega_p} UI_K, \quad (2.21)$$

где  $I_K$  – ток короткого замыкания, устанавливающийся в СГ при замыкании обмотки статора, в которой индуцируется ЭДС  $E_0$ .

Исходя из формулы (2.21) следует, что вращающий момент синхронного двигателя пропорционален приложенному напряжению, а в асинхронном двигателе – квадрату напряжения.

### 2.4.2 Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками синхронного двигателя называют зависимости частоты вращения ротора  $n$ , тока статора  $I$ , потребляемой из сети мощности  $P_1$ , полезного вращающего момента  $M_2$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности па валу двигателя  $P_2$  при постоянных значениях напряжения сети  $U$ , частоты сети  $f$  и тока возбуждения  $I_b$  (рисунок 2.22).

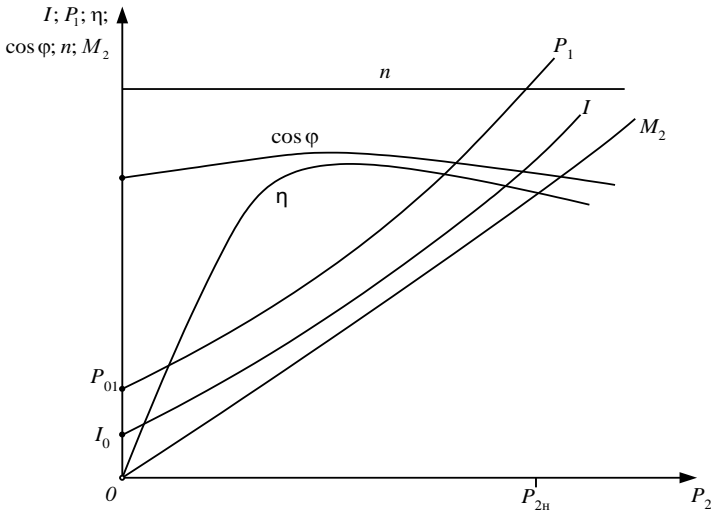


Рисунок 2.22 – Рабочие характеристики синхронного двигателя

Вид графика  $\cos\varphi$  зависит от настройки тока возбуждения: если в режиме холостого хода ток возбуждения установлен таким, что  $\cos\varphi = 1$ , то с ростом нагрузки коэффициент мощности снижается; если же установить  $\cos\varphi = 1$  при номинальной нагрузке, то при недогрузке двигатель будет забирать из сети реактивный опережающий ток, а при перегрузке – отстающий.

График  $M_2 = f(P_2)$  выходит из начала координат и линейно зависит от мощности на валу  $P_2$ , так как частота вращения  $n$  не изменяется.

Ток в обмотке якоря двигателя определяется по формуле  $I = \frac{P_1}{m_1 U \cos\varphi}$ . Из этого выражения видно, что с увеличением нагрузки на валу двигателя ток  $I$  растет быстрее, чем потребляемая мощность  $P_1$ , вследствие уменьшения  $\cos\varphi$ .

С ростом нагрузки на валу двигателя увеличиваются потери, поэтому потребляемая мощность  $P_1$  растет быстрее полезной мощности  $P_2$ , и график  $P_1 = f(P_2)$  имеет несколько криволинейный вид.

Коэффициент полезного действия синхронной машины обычно составляет 85–99 %. Наибольший КПД соответствует нагрузке  $0,5–0,75P_{\text{н}}$ , также существует тенденция к увеличению КПД при повышении мощности.

В синхронных машинах выделяют следующие **потери мощности**:

- механические, обусловленные трением в подшипниках, ротора о воздух, щеток о контактные кольца и вентиляционные потери;
- магнитные в стали статора, состоящие из потерь на гистерезис и вихревые токи;
- на возбуждение, куда входит мощность возбуждения и потери в самом возбудителе;
- электрические в обмотках статора;
- добавочные, которые слагаются из потерь на вихревые токи в проводках обмотки статора, потерь в стали ротора, вызванных пульсацией магнитного потока вследствие зубчатости сердечника статора, и др.

#### 2.4.3 Пуск синхронного двигателя

Пуск синхронного двигателя прямым включением в сеть невозможен, так как ротор, удерживаемый силами инерции, не может быть сразу увлечен магнитным полем статора, синхронная частота которого устанавливается тотчас же после включения статорной обмотки в сеть.

Пуск синхронного двигателя возможен лишь при условии предварительного разгона до частоты, равной синхронной или близкой к ней. Для синхронных двигателей обычно применяется асинхронный пуск, состоящий в том, что в начале пуска двигатель разгоняется как асинхронный. Для этого на роторе размещается пусковая обмотка. Она представляет собой латунные или бронзовые стержни, уложенные в пазы на поверхности полюсных наконечников ротора и замкнутые между собой с двух сторон.

В процессе пуска перед включением статорной обмотки СД в трехфазную сеть обмотка возбуждения, т. е. обмотка ротора, замыкается на сопротивление; постоянный ток в эту обмотку пока не подается. Если этого не сделать, то вращающееся магнитное поле статора, пересекая витки обмотки возбуждения ротора, будет индуцировать в ней значительную ЭДС, что представляет опасность для обслуживающего персонала и для целостности изоляции обмотки. Величина разрядного сопротивления должна быть примерно в 8–10 раз больше активного сопротивления обмотки возбуждения.

При подключении обмотки статора к сети возникает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует токи в пусковой обмотке ротора. В результате возникает вращающий момент, и двигатель разгоняется до некоторой установившейся частоты  $n_0$ . Все происходит так же, как и при пуске

асинхронного двигателя; поэтому частота  $n_0$  оказывается близкой к с частоте вращения магнитного поля, но меньшей ее на несколько процентов. Затем обмотка возбуждения отключается от сопротивления и подключается к источнику постоянного тока. В результате возникает обычный для СМ момент взаимодействия вращающегося поля статора и полюсов ротора, и СМ втягивается в синхронизм, т. е. ротор начинает вращаться синхронно с полем.

При значительном увеличении момента сопротивления синхронный двигатель может не втянуться в синхронизм.

Порядок останова синхронного двигателя следующий:

- 1) уменьшают общий ток статора, изменяя ток возбуждения;
- 2) отключают обмотку статора от сети;
- 3) после отключения статорной обмотки снимают возбуждение, замыкая ротор на разрядное сопротивление.

У мощных синхронных двигателей для уменьшения пускового тока применяется, как правило, пуск при помощи автотрансформатора или реактивных сопротивлений (реакторов), включаемых последовательно с обмоткой статора. Непосредственный пуск применяется только для двигателей относительно небольшой мощности – до сотен киловатт. Пусковая обмотка СД в отличие от обмотки ротора асинхронной машины рассчитывается для кратковременного процесса пуска и имеет относительно небольшую массу.

Синхронные двигатели имеют следующие достоинства:

- 1) возможность работы при  $\cos\varphi = 1$ ;
- 2) меньшая чувствительность к колебаниям напряжения, т. к. их вращающий момент пропорционален напряжению в первой степени, а не квадрату напряжения, как у асинхронных двигателей;
- 3) строгое постоянство частоты вращения, независимо от механической нагрузки на валу.

Недостатки синхронных двигателей:

- 1) конструкция сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током; вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже АД;
- 2) сравнительная сложность пуска;
- 3) трудности с регулированием частоты вращения, которое возможно лишь при изменении частоты питающего напряжения.

Сопоставление достоинств и недостатков синхронных двигателей показывает, что их целесообразно применять для установок большой мощности, в особенности для установок, работающих в условиях редких пусков.

#### **2.4.4 Синхронный компенсатор**

Изменение тока возбуждения синхронного двигателя вызывает изменение общего тока статорной обмотки. Кривые изменения тока двигателя в

зависимости от тока возбуждения имеют такой же характер, как и приведенные на рисунке 2.20. При перевозбуждении синхронный двигатель работает с опережающим током по отношению к току сети, улучшая  $\cos\varphi$  сети, а при недо возбуждении – с отстающим током, т. е. будет ухудшать  $\cos\varphi$  сети. С целью улучшения коэффициента мощности сети можно перевозбудить присоединенные к ней СД.

Синхронные машины облегченной конструкции, которые работают без нагрузки, с большим перевозбуждением, специально предназначенные только для улучшения коэффициента мощности сети, называют *синхронными компенсаторами*. Их используют также для регулирования напряжения в линиях электропередач.

Синхронный компенсатор работает без нагрузки, поэтому потребляемая им из сети активная мощность незначительна и расходуется на покрытие потерь в компенсаторе.

Мощность синхронного компенсатора выбирают по величине реактивной мощности, которую он должен компенсировать. Подключают его к шинам трансформаторной подстанции, что позволяет разгрузить линию передачи и генератор от реактивных токов.

**Пример 2.6.** В цехе завода установлены асинхронные двигатели, средняя мощность и  $\cos\varphi$  которых указаны в таблице 2.1.

Проектируется установка еще одного электрического привода компрессора, для которого предполагается использовать синхронный двигатель со следующими номинальными данными:  $P_n = 160$  кВт,  $U_n = 380$  В,  $n_n = 1000$  об/мин,  $\cos\varphi = 0,8$  (емкостной характер нагрузки).

Определить коэффициент мощности и ток нагрузки до и после установки синхронного двигателя (двигатель будет нагружен полностью).

**Таблица 2.1 – Параметры установленных асинхронных двигателей**

№ п/п	Число двигателей, $n_k$	Средняя потребляемая мощность одного двигателя $P_k$ , кВт	$\cos\varphi_k$
1	20	0,95	0,76
2	24	0,82	0,45
3	32	0,15	0,48
4	8	4,00	0,75
5	20	0,6	0,68
6	12	0,59	0,58
7	7	4,85	0,77

*Решение.* Определим активную и реактивную мощности нагрузки асинхронных двигателей (таблица 2.2) по формулам

$$P_i = P_{k_i} n_{k_i}, \quad Q_i = P_{k_i} n_{k_i} \operatorname{tg} \left( \arccos\varphi_{k_i} \right), \quad i = \overline{1,7}.$$

Таблица 2.2 – Активная и реактивная мощности нагрузки

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	Суммарная мощность
$P$ , кВт	19,0	19,7	14,4	32,0	12,0	7,1	19,4	$P_1 = 124$ кВт
$Q$ , квар	16,2	38,8	26,0	28,4	13,0	10	16,1	$Q_1 = 149$ квар

Мощности синхронного двигателя  $P_n = 160$  кВт и  $Q_n = 160 \cdot 0,75 = 120$  квар.

Суммарная мощность всей нагрузки после установки синхронного двигателя  $P_2 = P_1 + P_n = 124 + 160 = 284$  кВт,  $Q_2 = Q_1 - Q_n = 149 - 120 = 29$  квар.

Результирующий коэффициент мощности всех потребителей цеха:

– до установки синхронного двигателя

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \frac{124}{\sqrt{124^2 + 149^2}} = 0,66,$$

– после установки синхронного двигателя

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}} = \frac{284}{\sqrt{284^2 + 29^2}} = 0,995.$$

Ток, потребляемый всеми двигателями цеха, из сети:

– до установки синхронного двигателя

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3} U_n} = \frac{\sqrt{124^2 + 149^2}}{\sqrt{3} \cdot 380} = 294 \text{ А},$$

– после установки синхронного двигателя

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} U_n} = \frac{\sqrt{284^2 + 29^2}}{\sqrt{3} \cdot 380} = 432 \text{ А}.$$

Вывод: при увеличении активной мощности двигателей цеха в  $284 / 124 = 2,3$  раза ток, потребляемый из сети, увеличился лишь в 1,47 раза [5].

### Контрольные вопросы

- 1 Укажите области применения СМ в генераторном и двигательном режимах работы.
- 2 Принцип действия синхронного генератора.
- 3 Реакция якоря явнополюсного генератора при различном характере нагрузки.
- 4 Характеристики синхронного генератора.
- 5 Регулирование активной и реактивной мощностей синхронного генератора при его параллельной работе с сетью.
- 6 Понятие о параллельной работе синхронных машин.
- 7 Опишите принцип работы синхронного двигателя.
- 8 Запишите формулу для момента СД и приведите его угловую характеристику.
- 9 Способы пуска синхронного двигателя.
- 10 Регулирование коэффициента мощности синхронных машин.
- 11 Перечислите достоинства и недостатки применения синхронных двигателей.

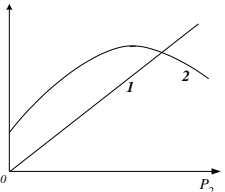


## 2.5 Программа самоконтроля по разделу «Синхронные машины»

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
1 Якорем называется	1) неподвижная часть генератора; 2) та часть генератора, где индуцируется ЭДС; 3) та часть генератора, где создается магнитный поток; 4) ротор генератора	120 134 145 170	2.1
2 Каким образом делают зазор между магнитопроводом статора и полюсным наконечником ротора явнополюсной синхронной машины для обеспечения синусоидальной формы индуцируемой ЭДС?	1) меньшим у середины полюсного наконечника, большим по краям; 2) большим у середины полюсного наконечника, меньшим по краям; 3) одинаковым по всей окружности полюсного наконечника	142 121 154	2.1
3 Якорь трехфазного синхронного генератора имеет 90 пазов. Определите угол между пазами в электрических градусах.	1) $10^\circ$ ; 2) $4^\circ$ ; 3) для ответа на вопрос недостаточно данных;	124 143 165	2.2
4 Определите ЭДС индуцируемую в витке обмотки якоря синхронного генератора, если $f = 50$ Гц, $\Phi = 0,02$ Вб	1) 1,11 В; 2) 4,44 В; 3) задача не определена, т. к. неизвестна частота вращения ротора	150 125 172	2.2
5 Определите шаг однофазной распределенной обмотки, если задано $q = 4$ ; $2p = 2$ ; $z = 24$ ; $y = \tau$	1) 6; 2) 12; 3) 24	147 119 171	2.2
6 Укажите номер паза, в котором лежит конец первой секции для рассмотренной выше обмотки.	1) 7; 2) для решения задачи недостаточно данных; 3) 13	129 177 152	2.2
7 Определите смещение обмоток соседних фаз четырехполюсного синхронного генератора. Укажите вариант <i>полного правильного ответа</i>	1) на 60 пространственных градусов; 2) на 120 электрических градусов; 3) на 120 электрических градусов или 60 пространственных градусов	160 176 139	2.2

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
<p>8 Известны данные трехфазной сосредоточенной обмотки СГ: <math>q = 1</math>; <math>m = 3</math>; <math>z = 18</math>; <math>p = 3</math>. Начало первой фазы в пазу 1. В каком пазу лежит конец первой катушки первой фазы?</p>	<p>1) 3; 2) 4; 3) 7; 4) 18</p>	<p>173 130 164 144</p>	<p>2.2</p>
<p>9 Почему фазы якорной обмотки трёхфазного синхронного генератора предпочитают соединять звездой?</p>	<p>1) чтобы увеличить ЭДС генератора; 2) чтобы устранить влияние третьей гармоники ЭДС; 3) чтобы устранить влияние пятой и седьмой гармоники ЭДС</p>	<p>174 148 131</p>	<p>2.2</p>
<p>10 В неподвижных обмотках якоря трёхфазного синхронного генератора образуется магнитное поле, вращающееся с частотой 1500 об/мин. С какой частотой вращается ротор генератора?</p>	<p>1) задача неопределенна, так как неизвестна частота тока в обмотках якоря; 2) задача неопределенна, так как неизвестно число полюсов ротора; 3) 3000 об/мин; 4) 1500 об/мин</p>	<p>169 132 155 135</p>	<p>2.3</p>
<p>11 Магнитный поток реакции якоря при активной нагрузке и насыщенном магнитопроводе</p>	<p>1) увеличивает поле под сбегющим краем полюсного наконечника и настолько же уменьшает под набегющим; 2) увеличивает магнитное поле машины; 3) уменьшает магнитное поле машины</p>	<p>157 133 175</p>	<p>2.3</p>
<p>12 При увеличении индуктивной нагрузки напряжение на зажимах синхронного генератора</p>	<p>1) увеличивается; 2) уменьшается; 3) не изменяется</p>	<p>161 137 159</p>	<p>2.3</p>
<p>13 Магнитный поток реакции якоря при емкостной нагрузке</p>	<p>1) искажает магнитное поле машины; 2) увеличивает магнитное поле машины; 3) уменьшает магнитное поле машины</p>	<p>138 158 178</p>	<p>2.3</p>
<p>14 При увеличении активно-индуктивной нагрузки магнитное поле полюсов ротора синхронного генератора</p>	<p>1) увеличивается; 2) уменьшается; 3) увеличивается и искажается; 4) уменьшается и искажается</p>	<p>122 156 179 146</p>	<p>2.3</p>

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
15 Зависимость $I_B = f(I)$ будет регулировочной характеристикой генератора, если	1) $f = \text{const}$ ; 2) $\cos\varphi = \text{const}$ ; 3) $U = \text{const}$ ; 4) выполняются все перечисленные выше условия	149 180 126 162	2.3
16 Как изменить ток возбуждения генератора, чтобы при увеличении тока нагрузки напряжение на ней оставалось неизменным?	1) увеличить; 2) не изменять; 3) уменьшить; 4) для ответа на вопрос недостаточно данных	168 153 123 181	2.3
17 Почему при увеличении активно-индуктивной нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается?	1) Вследствие увеличения падения напряжения на внутреннем сопротивлении якоря; 2) вследствие увеличения размагничивающего действия реакции якоря; 3) вследствие действия двух причин, указанных выше	166 127 182	2.3
18 Все условия включения на параллельную работу выполнены, кроме равенства напряжений генераторов: $U_1 \neq U_2$ . Что произойдет, если генераторы включить на параллельную работу?	1) появится реактивный уравнивающий ток; 2) появится уравнивающий ток с большой активной составляющей; 3) появится уравнивающий ток, изменяющийся по амплитуде; 4) в двух фазах появится уравнивающий ток	167 128 183 163	2.3
19 В какой момент производится включение генераторов на параллельную работу, если лампы синхроскопа включены «на погасание»?	1) когда лампа накаливания горит с полным накалом; 2) когда все лампы накаливания горят вполне накала; 3) когда все лампы накаливания гаснут; 4) когда вольтметр, подключенный к одноименным фазам, показывает нуль	136 184 151 141	2.3
20 Можно ли изменить: а) активную и б) реактивную мощности, отдаваемые генератором, изменив его ток возбуждения?	а) можно; б) можно; а) можно; б) нельзя; а) нельзя; б) можно	140 118 185	2.3

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
21 Как увеличить активную мощность, отдаваемую синхронным генератором в сеть?	1) увеличить ток возбуждения; 2) увеличить вращающий момент двигателя или турбины, приводящей генератор в действие; 3) увеличить коэффициент мощности нагрузки	117 186 198	2.3
22 Какой угол не принято обозначать $\theta$ ?	1) угол между осью полюсов и осью результирующего магнитного потока; 2) угол между векторами ЭДС и напряжением генератора; 3) угол между векторами напряжения и тока генератора	187 113 197	2.4
23 Как изменится угол $\theta$ , если активная мощность синхронного генератора увеличилась?	1) увеличится; 2) не изменится; 3) уменьшится	196 114 188	2.4
24 Синхронный двигатель развивает номинальный момент при $\theta=30^\circ$ . Определите перегрузочную способность двигателя $k_n = \frac{M_{\max}}{M_n}$ .	1) $k_n = 2$ ; 2) $k_n = 3$ ; 3) для решения задачи необходимо знать начальный момент; 4) для решения задачи необходимо знать максимальный момент	189 115 199 195	2.4
25 Какие зависимости отображают рабочие характеристики синхронного двигателя? 	1) $I - I = f(P_2)$ ; $2 - \cos = f(P_2)$ ; 2) $I - I = f(P_2)$ ; $2 - \eta = f(P_2)$ ; 3) $I - M_2 = f(P_2)$ ; $2 - \cos = f(P_2)$	194 116 190	2.4
26 Какая машина используется в качестве синхронного компенсатора?	1) перевозбужденный синхронный двигатель; 2) перевозбужденный синхронный генератор; 3) недозавозбужденный синхронный двигатель	112 200 191	2.4
27 Какие из указанных потерь не относятся к постоянным?	1) механические потери; 2) потери на гистерезис; 3) потери на вихревые токи; 4) потери на нагрев обмотки статора	201 192 111 193	2.4

### 3 ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Процесс совершенствования традиционных типов электрических машин продолжается более ста лет. За это время были достигнуты значительные успехи. Однако требования, предъявляемые современными электромеханическими устройствами к электрическим машинам, продолжают расти, а резервы повышения их показателей и характеристик в определенной степени исчерпаны.

Качественный скачок в этом направлении обозначен разработкой интеллектуальных электромеханических преобразователей энергии, которые одновременно осуществляют и преобразование энергии, и управление им. Одним из интеллектуальных электромеханических преобразователей энергии является вентильно-индукторный двигатель (ВИД).

ВИД представляет собой шаговый двигатель, работающий в режиме постоянного вращения. Шаговый двигатель – разновидность синхронного бесщёточного электродвигателя с несколькими обмотками, последовательная активация которых вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора.

Наиболее целесообразно использовать ВИД в качестве электропривода механизмов, в которых по условиям работы требуется осуществление регулирования в широком диапазоне частоты вращения. Примером здесь могут быть электроприводы станков с числовым программным управлением и промышленных роботов.

Эффективность использования ВИД существенно повышается, если необходимость регулирования частоты вращения сочетается с тяжелыми условиями работы, как это имеет место в электроприводах для металлургии, горнодобывающей промышленности и подвижного состава электрического транспорта.

В промышленности есть большой класс устройств и механизмов, использующих нерегулируемый электропривод, где энергетическая эффективность существенно возрастает при использовании регулируемого электропривода. К таким устройствам, прежде всего, относятся компрессоры, насосы и вентиляторы. Использование здесь ВИД является весьма перспективным.

Не менее перспективно применение ВИД в бытовой технике: стиральных машинах, пылесосах, кухонных комбайнах, электромясорубках, различных электроинструментах.

ВИД представляет собой относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии. Поэтому его продвижение на рынке происходит достаточно медленно. Однако уже сейчас многие электротехнические фирмы мира либо рассматривают возможность серийного выпуска ВИД, либо уже производят его. За последние десять лет доля применения ВИД в регулируемом электроприводе возросла в восемь раз. По всей видимости, эта цифра будет расти [6].

### 3.1 Структурная схема вентильно-индукторного двигателя

Как всякий электродвигатель, ВИД обеспечивает преобразование электрической энергии, которая поступает от питающей сети, в механическую энергию, передаваемую в нагрузку. Как система регулируемого электропривода, он дает возможность осуществлять управление этим процессом в соответствии с особенностями конкретной нагрузки: регулировать частоту вращения, момент, мощность и т. д.

ВИД представляет собой достаточно сложную электромехатронную систему, структурная схема которой приведена на рисунке 3.1 [6].

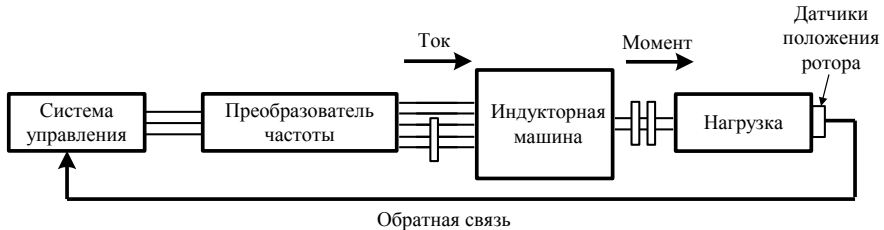


Рисунок 3.1 – Структурная схема ВИД

В ее состав входят: индукторная машина (ИМ) (рисунок 3.2), преобразователь частоты, система управления и датчики положения ротора (ДПР). Функциональное назначение этих элементов ВИД очевидно: преобразователь частоты обеспечивает питание фаз ИМ однополярными импульсами напряжения прямоугольной формы; ИМ осуществляет электромеханическое преобразование энергии; система управления в соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет данным процессом.



Рисунок 3.2 – ИМ конфигурации 6/4

По своей структуре ВИД ничем не отличается от классической системы регулируемого электропривода. Именно поэтому он и обладает всеми ее свойствами. Однако в отличие от регулируемого электропривода, например с асинхронным двигателем, индукторная машина в ВИД не является самодостаточной. Она принципиально неспособна работать без преобразователя частоты и системы управления. Преобразователь частоты и система управ-

ления являются неотъемлемыми частями ИМ, необходимыми для осуществления электромеханического преобразования энергии.

Индукторная машина, входящая в состав ВИД, может иметь различные конструктивные исполнения. На рисунке 3.3, для примера, приведено поперечное сечение четырехфазной ИМ конфигурации 8/6. При обозначении конфигурации ИМ первая цифра указывает число полюсов статора, вторая – ротора.

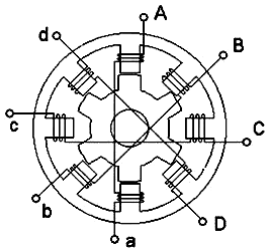


Рисунок 3.3 – Поперечное сечение четырехфазной ИМ конфигурации 8/6

ИМ имеет следующие конструктивные особенности:

– сердечники статора и ротора имеют явно-полосную структуру;

– число полюсов относительно невелико. При этом число полюсов статора больше числа полюсов ротора;

– сердечники статора и ротора выполняются шихтованными;

– обмотка статора состоит из сосредоточенных катушек. Она может быть одно- или многофазной;

– фаза ИМ, как правило, состоит из двух катушек, расположенных на диаметрально противоположных полюсах статора;

– катушки фазы могут быть соединены в электрическом отношении параллельно или последовательно; в магнитном – согласно или встречно;

– обмотка на роторе ИМ отсутствует.

Конструктивно ИМ, преобразователь частоты и система управления в ВИД могут быть выполнены раздельно. При этом в процессе работы они могут находиться на достаточно большом удалении друг от друга. В последнее время наблюдается тенденция выполнения преобразователя частоты и двигателя в одном корпусе [6].

### 3.2 Принцип действия ВИД

Принцип действия ВИД основан на свойстве ферромагнитных тел ориентироваться во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы пронизывающий их магнитный поток принимал максимальное значение.

Рассмотрим принцип действия ВИД на примере четырехфазного двигателя с ИМ конфигурации 8/6. На рисунке 3.4, *a* показано так называемое **рассогласованное взаимное положение сердечников статора и ротора** для фазы *A* этой машины.

Рассогласованным положением сердечников статора и ротора для некоторой фазы называется такое положение, при котором ось каждой катушки этой фазы совпадает с одной из осей *q* (рисунок 3.5) ротора, т.е. зубцы фазы

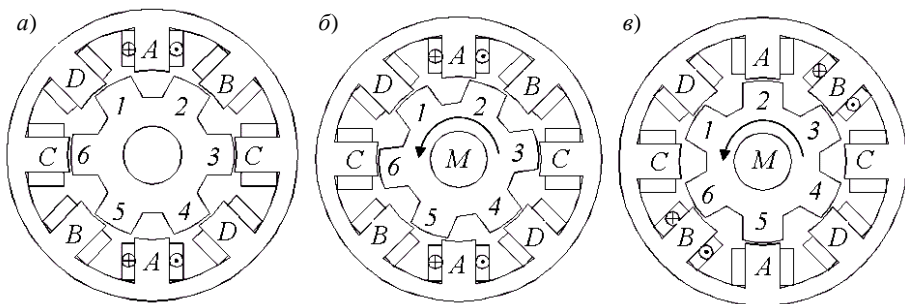


Рисунок 3.4 – Пояснение принципа действия ВИД:

*a* – рассогласованное положение сердечников для фазы *A*; *b* – промежуточное положение сердечников для фазы *A*; *c* – согласованное положение сердечников для фазы *A*

располагаются строго напротив пазов ротора. Это положение характеризуется минимальным значением индуктивности фазы и магнитного потока, сцепленного с ней, что объясняется максимальным значением магнитного сопротивления зазора между сердечниками. В теории ВИД рассогласованное положение одной из фаз принимается за начало отсчета углового положения сердечников статора и ротора. Примем за начало отсчета рассогласованное положение фазы *A*.

Предположим, что в этом положении по сигналу системы управления произойдет коммутация ключей преобразователя частоты и к фазе *A* будет приложено постоянное напряжение  $U_A$ ; тогда по катушкам фазы потечет ток  $i_A$ , который создаст МДС  $F_A$ . Эта МДС, в свою очередь, возбудит в машине магнитное поле.

В магнитном поле фазы *A* ротор будет стремиться ориентироваться таким образом, чтобы магнитный поток, пронизывающий его, принял максимальное значение. При этом на сердечники статора и ротора будут действовать одинаковые по значению и обратные по направлению электромагнитные силы притяжения. Очевидно, что силы, действующие на первый и четвертый зубцы ротора, будут стремиться повернуть его по часовой стрелке, а силы, действующие на второй и пятый зубцы – против. В силу того, что ротор в данном положении симметричен относительно оси возбужденной фазы, равнодействующая проекций на ось этих сил будет равна нулю. Таким образом, в рассогласованном положении ИМ и ВИД не развивают вращающего момента.

Рассогласованное положение представляет собой точку неустойчивого равновесия. Действительно, если под действием какого-либо внешнего воз-

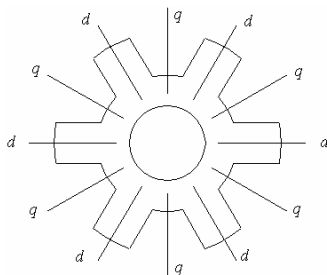


Рисунок 3.5 – Расположение осей ротора ИМ



действия ротор отклонится от рассогласованного положения в том или ином направлении, то равнодействующая проекций электромагнитных сил сердечников уже не будет равна нулю. Следовательно, возникнет вращающий момент, который будет стремиться повернуть ротор в направлении от рассогласованного положения.

Возьмем другое положение ротора, показанное на рисунке 3.4, б. Здесь фаза *A* имеет большее потокоцепление и индуктивность, чем в рассогласованном положении, что объясняется меньшей величиной зазора между сердечниками. При этом равнодействующая азимутальных составляющих ПС сердечников отлична от нуля, и созданный ею электромагнитный момент стремиться повернуть ротор ИМ против часовой стрелки.

Вращение ротора будет продолжаться до тех пор, пока он не займет положение, показанное на рисунке 3.4, в. Оно называется согласованным положением фазы *A*.

**Согласованным положением сердечников статора и ротора ИМ** для какой-либо фазы называется такое положение, при котором ось каждой катушки этой фазы совпадает с одной из осей *d* (см. рисунок 3.5) ротора, т.е. зубцы фазы располагаются строго напротив полюсов ротора. Это положение характеризуется максимальным значением индуктивности фазы и сцепленного с ней магнитного потока, что объясняется минимальной величиной магнитного сопротивления зазора между сердечниками.

В этом положении ПС притяжения сердечников имеют только радиальные составляющие, в силу чего вращающий момент ИМ в этом положении равен нулю.

Согласованное положение представляет собой точку устойчивого равновесия. Действительно, если под действием какой-либо внешней силы ротор отклонится от согласованного положения в ту или иную сторону, то возникший электромагнитный момент будет стремиться вернуть его в согласованное положение.

Для того чтобы продолжить однонаправленное вращение ротора, необходимо еще до достижения согласованного положения фазы *A* осуществить коммутацию ключей преобразователя частоты, в результате которой фаза *A* должна быть отсоединена от источника питания, а фаза, момент которой стремится продолжить вращение ротора в прежнем направлении, подключена к нему. В данном случае это фаза *B*.

Взаимное положение сердечников статора и ротора, близкое к согласованному положению для фазы *A*, является для фазы *B* близким к рассогласованному положению, т.е. при подаче на нее напряжения и протекании по ее катушкам тока возникнет отличный от нуля вращающий момент, который будет стремиться повернуть ротор против часовой стрелки (рисунок 3.6).

Необходимость коммутации фаз еще до достижения согласованного положения сердечников диктуется желанием получить как можно меньшее значение тока в отключаемой фазе при достижении ее согласованного положения. Дело в том, что после отключения фазы накопленная в ней энергия магнитного поля не может исчезнуть мгновенно. Она расходуется на поддержание постоянства потокоцепления фазы, в силу чего в ней возникает ЭДС самоиндукции, и ток фазы остается отличным от нуля еще некоторое время после ее коммутации. Он замыкается через

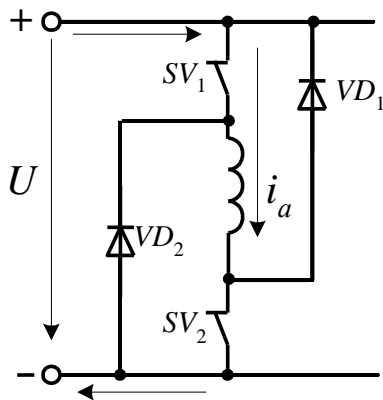


Рисунок 3.6 – Контуры замыкания тока в фазе ВИД

встречно включенный диод  $VD_2$ , ключ  $SV_2$  преобразователя частоты и питающую сеть. В конечном итоге ток достигнет нулевого значения (энергия магнитного поля выделится в виде электрических потерь на активных сопротивлениях фазы, встречно включенного диода  $VD_2$  и ключа  $SV_2$ ). Однако если этот ток будет отличен от нуля в согласованном положении фазы, то при дальнейшем вращении ротора созданное им магнитное поле приведет к возникновению тормозного электромагнитного момента. С целью более быстрого гашения поля в ИМ после отключения фазы на нее подают напряжение обратной полярности.

Фаза  $B$  будет находиться под напряжением до тех пор, пока ротор не достигнет положения, близкого к согласованному. При достижении этого положения от ДПР в систему управления поступит соответствующий сигнал, обработка которого приведет к выдаче управляющего воздействия на преобразователь частоты и переключению фаз  $B$  и  $C$ . При дальнейшем вращении ротора будет происходить повторение рассмотренного выше цикла.

Таким образом, проводя последовательную коммутацию фаз, можно осуществить однонаправленное вращение ротора ИМ. Последовательность коммутации фаз определяется алгоритмом, заложенным в систему управления. Исходными данными для ее работы являются сигналы о положении ротора, поступающие от ДПР, что исключает возможность неправильной коммутации фаз.

### 3.3 Алгоритмы коммутации фаз

В рассмотренном примере в каждый момент времени работает только одна фаза ИМ ( $A-B-C-D-A-\dots$ ). **Коммутация фаз ИМ**, при которой в каждый момент времени работает только одна его фаза, называется одиночной симметричной (рисунок 3.7, а).

Симметричная коммутация фаз является наиболее простой. Кроме нее в ИМ возможны парная симметричная коммутация и несимметричная коммутация фаз.

Коммутация фаз ИМ, когда в каждый момент времени работают две фазы ( $AB-BC-CD-DA-AB-\dots$ ), называется парной симметричной (рисунок 3.7, б).

Коммутация фаз ИМ, при которой попеременно работают то одна, то две фазы ( $A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A-\dots$ ), называется несимметричной (рисунок 3.7, в).

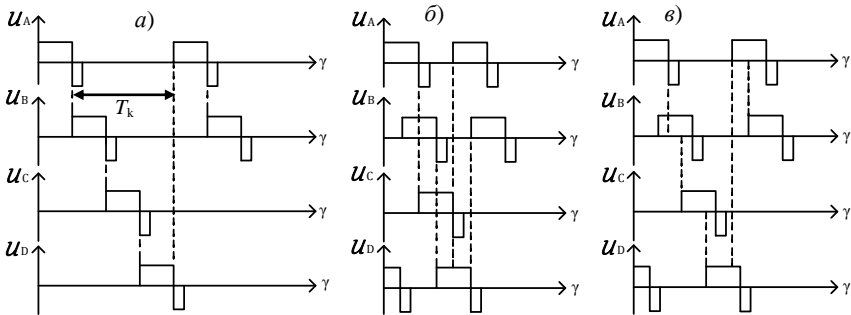


Рисунок 3.7 – Последовательность возбуждения фаз 4-фазного ВИД конфигурации 8/6 при различных алгоритмах коммутации:

а – симметричной одиночной; б – симметричной парной; в – несимметричной

Алгоритм коммутации фаз характеризуется несколькими параметрами:

- количеством тактов в полном цикле коммутации;
- тактовым углом  $\varepsilon$ , который определяет угол поворота ротора за один такт коммутации;
- числом тактов на один оборот ротора.

*Тактом* коммутации ( $T_k$ ) называется интервал времени, в пределах которого работает только одна фаза или их комбинация и не происходит включение другой фазы или их комбинации.

*Цикл* коммутации – это последовательность уникальных тактов, которая периодически повторяется. Количество тактов в полном цикле для случая симметричной одиночной или парной коммутации равно числу фаз, т. е.

$$\zeta = m,$$

а при несимметричной коммутации определяется удвоенным числом фаз

$$\zeta = 2m.$$

Тактовый угол  $\varepsilon$  в общем случае может быть найден по формуле

$$\varepsilon = 2\pi/(\zeta N_R),$$

где  $N_R$  – число зубцов ротора.

Используя последнее соотношение, легко получить выражение для количества тактов на один оборот ротора:

$$\xi = 2\pi/\varepsilon.$$

**Связь между частотой возбуждения фаз ИМ  $f$  и частотой вращения ротора  $n$ .** Пусть ротор двигателя вращается с частотой  $n$ . Тогда частота следования импульсов напряжения, прикладываемого к одной фазе двигателя, в этом случае равна

$$f = \begin{cases} \frac{\xi}{m} \frac{n}{60} & \text{– при симметричной одиночной коммутации;} \\ \frac{\xi}{2m} \frac{n}{60} & \text{– при симметричной парной коммутации;} \\ \frac{\xi}{3m} \frac{n}{60} & \text{– при несимметричной коммутации,} \end{cases}$$

или

$$f = \begin{cases} N_R \frac{n}{60} & \text{– при симметричной одиночной коммутации;} \\ \frac{N_R}{2} \frac{n}{60} & \text{– при симметричной парной коммутации;} \\ \frac{N_R}{3} \frac{n}{60} & \text{– при несимметричной коммутации.} \end{cases}$$

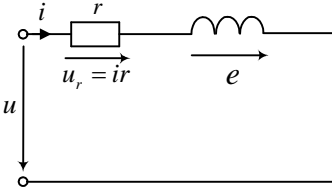
Коэффициенты 1/2 и 1/3 для симметричной парной и несимметричной коммутации объясняются тем, что каждая фаза работает на двух и трех тактах соответственно.

Число  $N_R$  всегда больше единицы, поэтому частота вращения магнитного поля статора в ИМ  $\Omega = 2\pi f$  всегда выше частоты вращения ротора  $\Omega_R = 2\pi n/60$ .

Отношение частоты вращения магнитного поля статора к частоте вращения ротора в ВИД называется *коэффициентом электромагнитной редукции*  $k_{зр} = kN_R$ , где  $k$  – коэффициент, равный соответственно 1, 1/2 и 1/3 для случаев симметричной одиночной, парной и несимметричной коммутации.  $k_{зр}$  определяется конструкцией двигателя (числом полюсов ротора  $N_R$ ) и алгоритмом управления коммутации фаз (числом тактов в полном цикле коммутации  $\zeta$ ).

### 3.4 Кривые тока фаз ИМ

Фаза ИМ представляет собой электрическую цепь (рисунок 3.8), значение тока  $i$  в которой определяется приложенным напряжением  $u$ , активным сопротивлением  $r$  и наведенной в фазе ЭДС  $e$ :



$$i = \frac{u + \varepsilon}{r}.$$

Рисунок 3.8 – Фаза ИМ

На рабочем интервале к фазе прикладывается постоянное напряжение, которое инвертируется в момент коммутации. ЭДС,

наводимая в фазе, обусловлена изменением сцепленного с ней магнитного потока

$$e = -\frac{d\psi}{dt}.$$

Угол коммутации  $\gamma$  характеризует процесс переключения вентиляей, когда в проводящем состоянии оказываются две фазы преобразователя. При вращении ротора от рассогласованного  $\gamma_u$  к согласованному  $\gamma_a$  положению сопротивление протеканию магнитного потока плавно уменьшается, что приводит к возрастанию потокосцепления фазы. Качественный характер данной зависимости для фазы  $A$  приведен на рисунке 3.9. Эта зависимость построена в предположении, что напряжение подается на фазу при угловом положении сердечников  $\gamma_{on} > \gamma_u$  и инвертируется при  $\gamma_{off} > \gamma_a$ . На рисунке 3.9 через  $\gamma_1$  обозначен угол, соответствующий началу перекрытия зубцов статора и ротора.

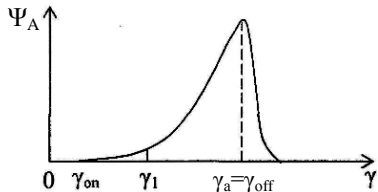


Рисунок 3.9 – Кривые изменения потокосцепления фазы

Наводимая в фазе ЭДС всегда направлена навстречу приложенному к фазе напряжению и нередко называется противоЭДС.

Приведенные рассуждения дают возможность построить качественную зависимость кривой фазного тока (рисунок 3.10). Анализ данного рисунка позволяет сделать вывод о том, что *ток фазы ИМ имеет резко несинусоидальный характер.*

На данной зависимости четко прослеживаются три участка:

- резкого нарастания тока ( $\gamma_{on} < \gamma < \gamma_1$ );
- медленного спадания тока ( $\gamma_1 < \gamma < \gamma_{off}$ );
- быстрого уменьшения тока до нулевого значения ( $\gamma > \gamma_{off}$ ).

Подача напряжения на фазу ИМ осуществляется в положении, близком к рассогласованному ( $\gamma_u < \gamma < \gamma_1$ ).

Резкое нарастание тока происходит при низком значении противоЭДС, которое наблюдается на интервале от рассогласованного положения  $\gamma_u$  до начала перекрытия полюсов статора и ротора  $\gamma_1$ . Замедление роста тока или даже его снижение на втором участке обусловлено резким нарастанием противоЭДС. Второй участок занимает

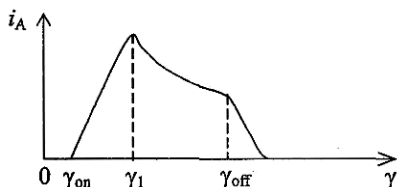


Рисунок 3.10 – Кривая фазного тока ИМ в ВИД конфигурации 8/6

угловой интервал от начала перекрытия полюсов статора и ротора  $\gamma_1$  до момента отключения фазы от источника питания  $\gamma_{off}$  (инвертирования напряжения). Третий участок сопровождается более резким по сравнению со вторым спаданием тока, что обусловлено тем, что на этом участке к фазе приложено напряжение обратной полярности.

Заметим, что характер кривой фазного тока зависит не только от величины приложенного напряжения, но и от частоты вращения ротора и углов включения и отключения фазы.

### 3.5 Магнитное поле в ИМ

Характер поля в электрической машине определяется поведением пространственного вектора  $F$  МДС ее обмоток.

В традиционных типах электромеханических преобразователей энергии магнитное поле может быть круговым, эллиптическим или пульсирующим. В ИМ магнитное поле носит более сложный характер по сравнению с полем в традиционных электрических машинах.

Проведем анализ поведения вектора  $F$  в ВИД с четырехфазной ИМ для случая идеальной симметричной одиночной коммутации. Под идеальной симметричной одиночной коммутацией здесь понимается алгоритм управления, при котором углы включения и отключения фаз подобраны таким образом, что взаимного перекрытия токовых волн соседних фаз не происходит (рисунок 3.11).

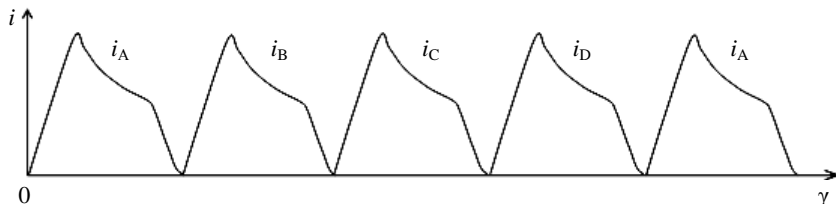


Рисунок 3.11 – Токи фаз при идеальной симметричной одиночной коммутации в ВИД четырехфазной ИМ

Исходя из определения алгоритма симметричной одиночной коммутации фаз, в каждый момент времени работает только одна фаза. Следова-

тельно, в пределах каждого такта коммутации направление вектора МДС в пространстве остается неизменным, а его величина изменяется в соответствии с изменением тока возбужденной фазы от нулевого значения в начале такта коммутации через максимальное значение до нулевого значения в конце такта коммутации.

В момент перехода системы из одного такта коммутации в другой вектор МДС ВИД изменяет свою ориентацию в пространстве на величину тактового угла. Количество положений вектора МДС в пространстве определяется числом фаз двигателя.

Напомним, что фазы ИМ питаются однополярными импульсами напряжения. Поэтому после окончания полного цикла коммутации (рисунок 3.12,  $z$ ), вектор МДС возвращается в свое первоначальное положение (рисунок 3.12,  $a$ ).

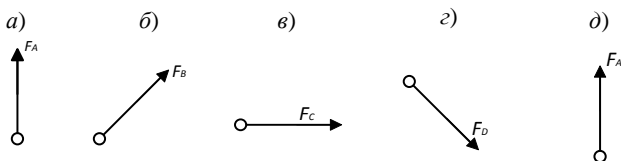


Рисунок 3.12 – Поведение вектора МДС в четырехфазном ВИД с ИМ конфигурации 8/6 для случая идеальной симметричной одиночной коммутации:

$a$  – включена фаза  $A$ ;  $b$  – включена фаза  $B$ ;  $c$  – включена фаза  $C$ ;

$d$  – включена фаза  $D$ ;  $e$  – включена фаза  $A$

В рассмотренном примере вектор МДС принимает в процессе работы двигателя строго определенные дискретные положения в пространстве. Причем в каждом таком положении поле носит пульсирующий характер. Таким образом, при идеальной симметричной одиночной коммутации фаз ИМ поле может быть охарактеризовано как дискретно-пульсирующее.

Рассмотренный случай одиночной коммутации фаз является идеальным, хотя принципиально он может быть реализован. На практике при использовании симметричной одиночной коммутации токовые волны соседних фаз перекрывают друг друга (рисунок 3.13). Это явление в еще большей степени проявляется при использовании других алгоритмов управления.

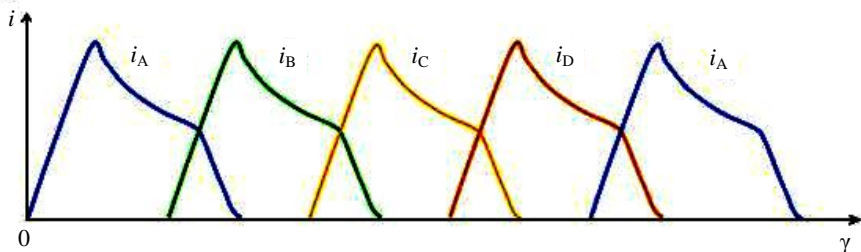


Рисунок 3.13 – Фазные токи при реальной симметричной одиночной коммутации в ВИД с четырехфазной ИМ

Таким образом, результирующий вектор МДС за полный цикл коммутации осуществляет плавный поворот в пространстве от оси первой до оси последней фазы двигателя. После чего он возвращается в исходное положение, и цикл повторяется. При этом амплитуда вектора МДС несколько раз изменяется от некоторого минимального до некоторого максимального значения. Годограф (геометрическое представление об изменении со временем физической величины, изображаемой переменным вектором) МДС имеет вид, представленный на рисунок 3.14.

Можно сделать вывод о том, что в ВИД магнитное поле не может быть ни круговым, ни эллиптическим, ни даже пульсирующим в обычном понимании. Оно имеет сложный характер и в пределе стремится к дискретно-пульсирующему.

Следует также отметить, что вектора МДС и ротор ИМ имеют различные направления вращения. Это означает, что если переключение фаз происходит, например, по часовой стрелке, то есть  $A-B-C-D-A-\dots$ , то вращение магнитного поля и ротора – против, то есть  $A-D-C-B-A-\dots$ .

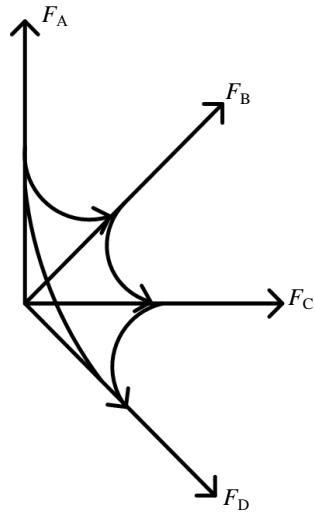


Рисунок 3.14 – Годограф вектора МДС в четырехфазной ИМ при симметричной одиночной коммутации

### 3.6 Кривая изменения мгновенного момента фазы ВИД

Исходя из принципа действия ВИД, каждая его фаза может развивать ненулевой вращающий момент в двигательном режиме на интервале от несогласованного до согласованного положения. Этот интервал называется

абсолютной моментной зоной и определяется соотношением  $\gamma_{abs} = \frac{\pi}{N_R}$ .

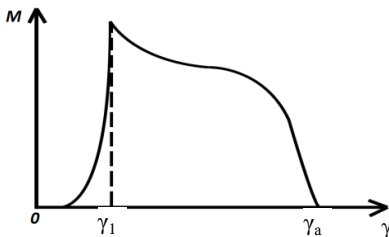


Рисунок 3.15 – Кривая мгновенного момента фазы двигателя

На границах абсолютной моментной зоны момент, развиваемый фазой, принимает нулевое значение. Примерный характер его изменения внутри нее показан на рисунке 3.15.

Экспериментальные исследования данной зависимости показывают, что максимальный момент фаза развивает на интервале увеличения взаимного перекрытия полюсов статора и ротора.



Этот интервал называется *эффективной моментной зоной фазы* и определяется по формуле  $\gamma_{eff} = \min(\beta_R; \beta_S)$ , где  $\beta_R, \beta_S$  – угловой размер полюсов ротора и статора.

На рисунке 3.16 показана кривая момента, развиваемого фазами при одиночной коммутации. Ее анализ позволяет сделать вывод о том, что момент ВИД не является величиной постоянной и характеризуется пульсациями, которые приводят к нестабильности частоты вращения.

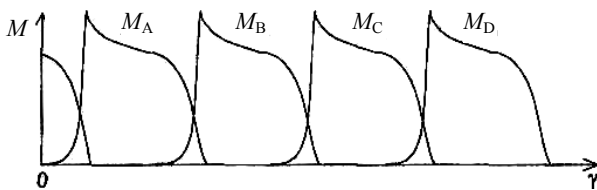


Рисунок 3.16 – Момент ВИД с четырехфазной ИМ при симметричной одиночной коммутации

Несколько снизить пульсации момента ВИД можно за счет использования парной или несимметричной коммутации фаз. Также на пульсации момента оказывают влияние конфигурация и форма пазов и зубцов ротора.

### 3.7 Достоинства и недостатки ВИД

Электромагнитные силы взаимодействия сердечников статора и ротора в ИМ имеют две составляющие: одна из них определяет вращающий момент двигателя, а вторая влечет за собой деформацию сердечников. Деформация сердечников приводит к возникновению вибрации двигателя и излучению звуковых волн. Исследования показывают [6], что основным элементом конструкции ИМ, излучающим звуковые волны, является сердечник статора.

Момент и создающие его силы имеют резко несинусоидальный характер и могут быть разложены в ряд Фурье. Как всякая механическая система, сердечник статора имеет резонансные частоты собственных свободных колебаний. При совпадении частоты какой-либо гармоники пondersомоторной силы с одной из собственных частот колебаний статора возникает явление механического резонанса, которое сопровождается резким возрастанием амплитуды деформаций сердечника по данной гармонике и следовательно, уровня шума, излучаемого двигателем.

Исследования показывают, что наиболее важными являются первые три резонансные частоты. Характер деформаций статора при возникновении резонанса по ним для случая трехфазного двигателя конфигурации 6/4 условно представлен на рисунке 3.17.

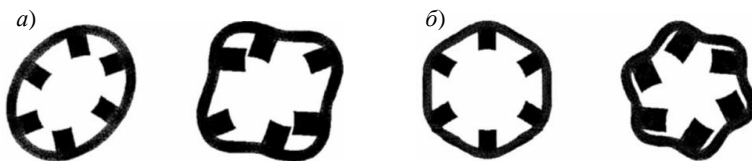


Рисунок 3.17 – Деформация статора при резонансе по второй (а) и третьей (б) резонансным частотам

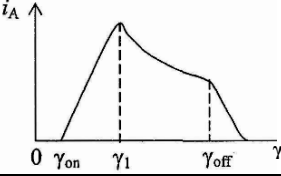
Для снижения уровня шумов и вибраций следует проектировать ВИД таким образом, чтобы резонансные частоты сердечника статора принимали как можно большие значения. При этом резко снижается вероятность того, что первые гармоники в кривой пондеромоторной силы будут иметь частоты, совпадающие с резонансными.

*Достоинства ВИД:* простота конструкции ИМ, высокая надежность, низкие потери в роторе, минимальные температурные эффекты, низкий момент инерции, возможность работы на больших частотах вращения, возможность работы в агрессивных средах, высокая степень утилизации.

*Недостатки ВИД:* высокий уровень шумов и вибраций, плохое использование стали, работа возможна только совместно с преобразователем частоты, значительные отходы при штамповке.

### 3.8 Программа самоконтроля по разделу «Вентильно-индукторный двигатель»

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
1 Укажите элемент, не принадлежащий структурной схеме ВИД?	1) датчик положения ротора; 2) преобразователь частоты; 3) источник питания; 4) система управления	202 203 204 205	3.1
2 Согласно положению сердечников статора и ротора ИМ называется положение, при котором	1) зубцы фазы располагаются строго напротив пазов ротора; 2) зубцы фазы располагаются строго напротив середины полюсов ротора; 3) зубцы фазы располагаются строго напротив полюсов ротора	206 207 208	3.2
3 Определите частоту следования импульсов при симметричной одиночной коммутации, если ротор вращается с частотой 3000 об/мин, а число зубцов ротора равно четырем	1) 100 Гц; 2) 50 Гц; 3) 200 Гц; 4) для определенного ответа недостаточно данных	209 210 211 212	3.3

Задание	Ответ	Номер консультации	При неправильном ответе повторить подраздел
4 Чему равна частота вращения магнитного поля статора для несимметричной коммутации, если частота вращения ротора составляет 3000 об/мин?	1) 3000 об/мин;	213	3.3
	2) 1000 об/мин;	214	
	3) 1500 об/мин	215	
5 Укажите участок подачи напряжения на кривой фазного тока? 	1) $\gamma_u < \gamma < \gamma_1$ ;	223	3.4
	2) в окрестности $\gamma_1$ ;	224	
	3) $\gamma_1 < \gamma < \gamma_{off}$ .	225	
6 Выберите правильное название характера магнитного поля в ВИД	1) круговое;	216	3.5
	2) эллиптическое;	217	
	3) имеет сложный характер	218	
7 Каким из перечисленных достоинств не обладает ВИД?	1) высокая надежность ИМ;	219	3.7
	2) низкий уровень шума;	220	
	3) простота конструкции ИМ;	221	
	4) низкие потери в роторе	222	

### Контрольные вопросы

- 1 Опишите назначение входящих в состав ВИД преобразователя частоты, системы управления и датчиков положения ротора.
- 2 Принцип действия ВИД.
- 3 Что понимается под термином “коммутация фаз”?
- 4 Как осуществляется подача напряжения на фазу ИМ при вращении ротора от рассогласованного к согласованному положению?
- 5 Нарисуйте кривую фазного тока ИМ в ВИД и поясните, чем обусловлено появление на ней трех характерных участков.
- 6 С помощью зависимости фазных токов от угла коммутации укажите различие между идеальной и реальной симметричной одиночной коммутацией.
- 7 Опишите характер магнитного поля в ИМ.
- 8 Перечислите основные достоинства и недостатки применения ВИД.

## 4 КОНСУЛЬТАЦИИ ПО ПРОГРАММАМ САМОКОНТРОЛЯ

### 4.1 Раздел «Машины постоянного тока»

1 Ток возбуждения увеличивается, а *частота* вращения двигателя уменьшается. См. подразд. 1.5.

2 Правильно. ЭДС определяется непосредственно по графику при условии, что ток возбуждения равен нулю.

3 Коллектор набирают из ламелей, которые изготавливают из меди; поверхность их специально обрабатывают для повышения устойчивости к истиранию. К ламелям припаивают секции обмотки якоря. См. подразд. 1.2.

4 Это механическая характеристика двигателя с параллельным подключением обмотки возбуждения. См. подразд. 1.5.

5 Правильно. При увеличении нагрузки ЭДС и напряжение генератора уменьшаются.

6 Воспользуйтесь формулой  $U = E + I_a r_a$ .

7 Правильно. В момент пуска  $E = 0$ , поэтому  $I_a = U / r_a = 100 / 0,1 = 1000$  А.

8 Вы неправильно определили номер коллекторной пластины, к которой припаяно начало второй секции. См. подразд. 1.2.

9 Правильно. ЭДС остаточного магнетизма не зависит от нагрузки.

10 Для двигателей параллельного возбуждения  $M \sim I_a$ , а у двигателей последовательного возбуждения  $M \sim I_a^2$ , и двигатели последовательного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент.

11 При уменьшении нагрузки *частота* двигателя увеличивается.

12 Для ответа на вопрос к номеру коллекторной пластины, припаянной к началу первой секции, прибавьте шаг по коллектору. См. подразд. 1.2.

13 Правильно. Ширина секции равна трем пазам.

14 Правильно. При переключении и цепи возбуждения и якоря направление вращения останется прежним.

15 Втулка представляет собой основную конструктивную деталь коллектора. На втулке крепятся ламели, электрически изолированные друг от друга миканитовыми прокладками.

16 Наоборот, условия пуска будут более легкими.

17 Правильно. ЭДС уменьшается, так как уменьшается общий магнитный поток.

18 Значение индуцируемой в проводнике обмотки якоря ЭДС  $e_{пр} = B l v = 1 \cdot 0,1 \cdot 1 = 0,1$  В.

19 Такую ЭДС машина развивает при больших токах возбуждения. См. подразд. 1.4.

20 Механическая нагрузка определяется потребителем, и если она не больше номинальной, уменьшать ее не нужно. Повторите выбор ответа.

21 Воспользуйтесь формулой не для генераторного, а для двигательного режима работы машины постоянного тока:  $U = E + I_a r_a$ . См. подразд. 1.1.

22 Частота будет увеличиваться, так как  $M_{вр} > M_{торм}$ . См. подразд. 1.6.

23 Это механическая характеристика двигателя с последовательным подключением обмотки возбуждения. См. подразд. 1.5.

24 При увеличении числа коллекторных пластин пульсации напряжения на щетках уменьшаются. См. подразд. 1.1.

25 Реакция якоря действительно уменьшает ЭДС.

26 Воспользуйтесь зависимостью между моментом и током якоря для двигателя последовательного возбуждения  $M \sim I_a^2$ . См. подразд. 1.5.

27 Ширина секции измеряется разностью номеров пазов, в которых уложены начало и конец секции.

28 Правильно. Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты перемагничивания, которая, в свою очередь, пропорциональна скорости вращения якоря.

29 Правильно.

30 Ответы ошибочны. При рассуждениях используйте формулу  $n = \frac{U - I_a r_a}{c_E \Phi}$ . См. подразд. 1.5.

31 У двигателя ослабление магнитного поля наблюдается под сбегющим краем полюса. См. подразд. 1.3.

32 Ответ ошибочен. Вспомните определения первого и второго частичных шагов петлевой обмотки. См. подразд. 1.2.

33 Щетки надо повернуть в сторону смещения физической нейтрали.

34 Ответ ошибочен. При рассуждениях используйте формулу  $n = \frac{U - I_a r_a}{c_E \Phi}$ . См. подразд. 1.5.

35 Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты перемагничивания, которая пропорциональна скорости вращения якоря. См. подразд. 1.8.

36 При помощи миканитовых прокладок ламели коллектора электрически изолируют друг от друга. См. подразд. 1.1.

37 Виток займет положение, при котором его плоскость будет перпендикулярна магнитным силовым линиям.

38 Правильно. В этом случае ЭДС вращения компенсирует ЭДС самоиндукции  $e_s$  и ЭДС взаимоиндукции  $e_m$ .

39 Напряжение пропорционально изменению магнитной индукции при отсутствии насыщения магнитопровода, а для определения магнитных потерь используются формулы  $P_r = \sigma_r \frac{f}{100} B_m^2 m$  и  $P_{вх} = \sigma_{вх} \left( \frac{f}{100} \right)^2 B_m^2 m$ .

40 Необходимо воспользоваться законом электромагнитной индукции  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ . По условию задачи скорость изменения магнитного потока постоянна (поток уменьшается равномерно), следовательно, ЭДС постоянная,  $|e| = \Delta\Phi / \Delta t = 10 / 2 = 5$  В.

41 Воспользуйтесь следующими формулами для простой двухслойной волновой обмотки:  $y = y_1 + y_2$ ;  $y_1 = y_k = \frac{K \pm 1}{p}$ ;  $2a = 2$ ;  $y_1 = \frac{Z_{\text{эл}} \pm b}{2p}$ .

42 Для самовозбуждения необходимо выполнение следующих условий: 1) наличие остаточного магнитного потока полюсов; 2) правильное подключение концов обмотки возбуждения или правильное направление вращения; 3) сопротивление цепи возбуждения  $r_v$  при данной скорости вращения  $n$  должно быть ниже некоторого критического значения.

43 При отключенной нагрузке ток якоря будет небольшим, сравнительно малым будет и количество тепла, выделяющегося в обмотке якоря.

44 Ответ ошибочен. Значение индуктируемой в проводнике обмотки якоря ЭДС  $e_{\text{пр}} = B l v$ . См. подразд. 1.1.

45 Это следствие реакции якоря при наличии насыщения магнитной системы машины. См. подразд. 1.3.

46 Правильно. При уменьшении числа коллекторных пластин пульсации напряжения на щетках увеличиваются. У первого генератора число коллекторных пластин меньше, следовательно, пульсации больше, чем у второго.

47 Напряжение постоянного тока на зажимах якоря генератора будет меньше  $E$  на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря  $r_a$ , то есть  $E = U + I_a r_a$ . Приложенное к якорю двигателя напряжение уравновешивается противоЭДС  $E$  и падением напряжения в обмотке якоря:  $U = E + I_a r_a$ .

48 Ответы ошибочны. При рассуждениях используйте формулу  $n = \frac{U - I_a r_a}{c_E \Phi}$ . См. подразд. 1.5.

49 Для самовозбуждения необходимо выполнение следующих условий: 1) наличие остаточного магнитного потока полюсов; 2) правильное подключение концов обмотки возбуждения или правильное направление вращения; 3) сопротивление цепи возбуждения  $r_v$  при данной скорости вращения  $n$  должно быть ниже некоторого критического значения.

50 Правильно. При согласном включении последовательной обмотки возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет более мягкую механическую характеристику по сравнению с двигателем параллельного возбуждения, но более жесткую по сравнению с двигателем последовательного возбуждения.

- 51 Это неправильный ответ. См. подразд. 1.4.
- 52 Правильно. У двигателя ослабляется магнитное поле под сбегающим краем полюса.
- 53 С увеличением нагрузки напряжение на зажимах генератора действительно уменьшается.
- 54 Правильно. Конец первой секции и начало второй секции припаяны к одной и той же коллекторной пластине.
- 55 Правильно, так как  $M \sim I_a^2$ .
- 56 Это следствие реакции якоря.
- 57 Ширина секции измеряется разностью номеров пазов, в которых уложены начало и конец секции.
- 58 Правильно. При уменьшении механической нагрузки на валу, а следовательно, и тока якоря, равного току возбуждения, частота сериесного двигателя резко увеличивается.
- 59 Вспомните, что результирующий магнитный поток уменьшится. Реакция якоря размагничивает генератор и снижает его ЭДС.
- 60 У генератора под набегающим краем полюса магнитное поле ослабляется, под сбегающим – усиливается. Дайте верный ответ.
- 61 Реакция якоря искажает магнитное поле электрической машины. См. подразд. 1.4.
- 62 Вы правы, пружина не является деталью коллектора. Пружины устанавливаются в щеткодержателях и обеспечивают постоянное давление в скользящем контакте между коллектором и щеткой.
- 63 Необходимо либо изменить направление магнитного потока, т. е. переключить обмотку возбуждения, либо изменить направление тока в якоре. При переключении и цепи возбуждения, и якоря направление вращения останется прежним. См. подразд. 1.6.
- 64 Правильно. Нужно совместить щетки с физической нейтралью.
- 65 При неправильной полярности тока в обмотке возбуждения генератор не возбуждается. См. подразд. 1.4.
- 66 В формулу для индуктируемой в проводнике обмотки якоря ЭДС  $e_{пр} = B l v$  активную длину проводника необходимо подставлять в метрах. См. подразд. 1.1.
- 67 Обратите внимание на равномерность уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур, т.е. он изменяется с равномерной скоростью.
- 68 Правильно.
- 69 Магнитный поток возбуждения с увеличением нагрузки действительно уменьшается, так как уменьшаются напряжение на зажимах генератора и ток возбуждения.
- 70 Обратите внимание, что машина имеет четыре полюса ( $2p = 4$ ). См. подразд. 1.2.

71 При любой полярности полюсов ослабление магнитного потока у генератора происходит под набегающим краем каждого полюса. См. подразд. 1.3.

72 Воспользуйтесь формулами следующими расчета простой двухслойной петлевой обмотки:  $y = y_k = 1$ ;  $y_1 = \frac{Z_{\text{эл}}}{2p} \pm b$ ;  $y = y_1 - y_2$ . См. подразд. 1.2.

73 Вы неправильно определили номер паза, в котором лежит конец первой секции. См. подразд. 1.2.

74 Для ответа на данный вопрос воспользуйтесь формулой  $E = c_E n \Phi$ .

75 Магнитное поле у генератора ослабляется под набегающим краем полюса.

76 Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты перемагничивания, которая, в свою очередь, пропорциональна скорости вращения якоря. См. подразд. 1.7.

77 Пусковой реостат включается в цепь якоря, а не в цепь возбуждения.

78 Правильно.

79 Ответы ошибочны. Повторите подразд. 1.1 и сделайте правильный выбор ответа.

80 Правильно.

81 При рассуждениях используйте формулу  $n = \frac{U - I_a r_a}{c_E \Phi}$ . Обратите

внимание, что при уменьшении сопротивления в цепи возбуждения магнитный поток увеличится. См. подразд. 1.5.

82 Правильно.  $U = E + I_a r_a = 99 + 10 \cdot 0,1 = 100$  В.

83 В этом случае ЭДС вращения имеет тот же знак, что и реактивная ЭДС, а значит их сумма будет больше нуля. См. подразд. 1.3.

84 Правильно. Сопротивление обмотки якоря практически не влияет на процесс самовозбуждения генератора.

85 В этом случае ЭДС вращения равна нулю, а ЭДС самоиндукции  $e_s$  и ЭДС взаимной индукции  $e_m$  не равны нулю. См. подразд. 1.3.

86 Сгорит пусковой реостат, так как он не рассчитан на работу в длительном режиме.

87 В момент пуска  $E = 0$ , воспользуйтесь формулой  $I_a = U / r_a$ .

88 Правильно. Пусковой реостат рассчитан на кратковременную работу.

89 Ширина секции измеряется разностью номеров пазов, в которых уложены начало и конец секции и равна трем пазам.

90 Необходимо повторить подраздел 1.5.

91 Правильно. Согласно закону электромагнитной индукции для контура  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ . По условию задачи скорость изменения магнитного потока



постоянна (поток уменьшается равномерно), следовательно, ЭДС постоянная,  $|e| = \Delta\Phi/\Delta t = 10/2 = 5$  В. См. подразд. 1.1.

92 Величина пульсаций зависит от числа коллекторных пластин. Чем больше коллекторных пластин, тем меньше пульсации.

93 Необходимо воспользоваться формулой для индуцируемой в проводнике обмотки якоря ЭДС  $e_{\text{пр}} = Blv$ . См. подразд. 1.1.

94 При изменении направления вращения изменяется на обратное направление силовых линий магнитного поля, создаваемого этим током. См. подразд. 1.6.

95 Правильно, так как  $M_{\text{эм}} = c_M I_a \Phi$ .

96 Вращающий момент пропорционален произведению магнитного потока на ток якоря:  $M_{\text{эм}} = c_M I_a \Phi$ .

97 Правильно. При прочих равных условиях  $E \equiv n$ .

98 Правильно. Для генератора –  $E = U + I_a r_a$ , для двигателя –  $U = E + I_a r_a$ .

99 Это следствие реакции якоря, вызывающей искажение магнитного поля.

100 Набегающий край полюса помечен буквой б. Правильно, здесь магнитное поле основных полюсов ослабляется из-за размагничивающего действия реакции якоря.

101 Вы ошибаетесь. Пульсации напряжения на щетках определенным образом зависят от числа коллекторных пластин. Чем меньше коллекторных пластин, тем больше пульсации.

102 Правильно.

103 Ответ ошибочен. В момент пуска  $E = 0$  и  $n = 0$ , воспользуйтесь формулой  $I_a = U / r_a$ .

104 Вращающий момент пропорционален произведению магнитного потока на ток якоря:  $M_{\text{эм}} = c_M I_a \Phi$ .

105 Виток не будет вращаться и займет положение, при котором его плоскость будет перпендикулярна магнитным силовым линиям.

106 Правильно. Обычно минимально допустимая нагрузка  $P_2 \approx 0,2P_n$ , при которой частота может достигнуть значения  $n > n_{\text{пред}}$ , опасная для целостности двигателя.

107 ЭДС прямо пропорциональна скорости вращения. См. подразд. 1.1.

108 Правильно.

109 Правильно.

110 При уменьшении тока возбуждения частота вращения двигателя последовательного возбуждения увеличивается. См. подразд. 1.5.

## 4.2 Раздел «Синхронные машины»

111 Потери на вихревые токи относят к постоянным потерям синхронной машины.

112 Правильно.

113 Физически угол  $\theta$  означает, что в двигателе полюсы ротора отстают от вращающегося магнитного поля. См. подразд. 2.4.

114 При нагрузке ротор синхронного двигателя отстает на некоторый угол от вращающегося магнитного поля, причем с увеличением нагрузки угол  $\theta$  возрастает.

115 Вращающий момент синхронной машины и ее мощность пропорциональны синусу угла сдвига между осями полюсов ротора и результирующего магнитного поля машины. См. подразд. 2.4.

116 Вы перепутали кривые, изображающие данные зависимости. Изучите более внимательно рабочие характеристики синхронного двигателя. См. подразд. 2.4.

117 Изменяя ток возбуждения, можно менять лишь величину реактивной мощности синхронного генератора.

118 Изменяя ток возбуждения, можно изменить величину реактивной мощности генератора, но нельзя изменить величину его активной мощности. См. подразд. 2.3.

119 Правильно.  $y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{24}{2} = 12$ .

120 Эта часть машины называется статором.

121 Ответ ошибочен. Необходимо обратить внимание, что при прочих равных условиях чем больше зазор, тем меньше величина магнитной индукции.

122 При увеличении активно-индуктивной нагрузки также увеличивается размагничивающее действие реакции якоря. См. подразд. 2.3.

123 Чтобы поддерживать напряжение синхронного генератора постоянным при увеличении индуктивной или активной нагрузки ток возбуждения надо увеличивать. См. подразд. 2.3.

124 Для ответа на вопрос недостаточно данных, так как неизвестно число полюсов генератора.

125 Правильно.  $E_{\text{витка ср}} = 4,44f\Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,02 = 4,44 \text{ В}$ .

126 Необходимо выполнение всех трех условий:  $U = \text{const}$ ,  $\cos\varphi = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ . См. подразд. 2.3.

127 Это правильный, но неполный ответ.

128 Если напряжения генераторов не равны, а остальные условия выдержаны, то в обмотках генераторов возникает уравнивающий ток  $I_{\text{ур}}$ . См. рисунок 2.18, а.

129 Необходимо учесть, что между первым пазом и пазом, в котором лежит конец первой секции, находится 12 пазов (шаг обмотки). См. пример 2.2.

130 Правильно:  $y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{18}{2 \cdot 3} = 3$ , затем прибавляем найденный шаг к номеру паза, в котором лежит начало катушки.

131 Действие пятой и седьмой гармоник ослабляют, укорачивая шаг обмотки.

132 Ответ неверный. Задачу можно решить, не зная числа полюсов ротора. См. подразд. 2.3.

133 При активной нагрузке и насыщенном магнитопроводе поток реакции якоря несколько уменьшает магнитное поле машины.

134 Правильно.

135 Правильно, частота вращения магнитного поля якоря генератора равна частоте вращения индуктора.

136 Вспомните, что на параллельную работу включают генераторы, напряжения которых находятся в противофазе. См. подразд. 2.3.

137 Правильно.

138 При емкостной нагрузке магнитный поток реакции якоря и магнитный поток индуктора совпадают по направлению. См. подразд. 2.3.

139 Правильно. В четырехполюсной машине один пространственный градус равен двум электрическим.

140 Изменяя ток возбуждения, нельзя изменить величину активной мощности генератора. См. подразд. 2.3.

141 Правильно, нулевое показание вольтметра свидетельствует о том, что напряжения генераторов находятся строго в противофазе (сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ ).

142 Правильно. В этом случае создается близкое к синусоидальному распределение магнитной индукции по длине воздушного зазора.

143 Для решения задачи необходимо знать число полюсов генератора.

144 Для определения номера паза, в который следует уложить конец первой катушки первой фазы, к номеру паза, где находится начало секции, прибавляем  $y$ :  $1 + y = 1 + 18/6 = 4$ .

145 Эту часть машины называют индуктором.

146 Правильно.

147 Вы ошиблись.  $y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{24}{2} = 12$ . См. подразд. 2.2.

148 Правильно. При соединении треугольником ЭДС третьей гармоники складываются и создают ток, дополнительно нагревающий обмотку, при соединении звездой ЭДС третьей гармоники взаимно уравновешиваются.

149 Это условие необходимо, но недостаточно. См. подразд. 2.3.

150 Ответ ошибочен.  $E_{\text{витка ср}} = 4,44f\Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,02 = 4,44$  В. См. подразд. 2.2.

151 Подумайте, как более точно определить момент включения.

152 Правильно. Между первым пазом и пазом, в котором лежит конец первой секции, находится 12 пазов (шаг обмотки).

153 Чтобы поддерживать напряжение синхронного генератора постоянным, ток возбуждения надо изменять. См. подразд. 2.3.

154 В этом случае магнитная индукция по ширине воздушного зазора была бы распределена равномерно, а для получения синусоидальной ЭДС необходимо синусоидальное распределение магнитной индукции. См. подразд. 2.1.

155 Частота вращения магнитного поля статора равна частоте вращения ротора генератора. См. подразд. 2.3.

156 Правильно, с повышением нагрузки увеличивается размагничивающее действие реакции якоря.

157 Из-за нелинейных свойств электротехнической стали уменьшение магнитного потока под сбегающим краем полюсного наконечника не компенсируется увеличением потока под набегающим краем. В результате результирующий магнитный поток уменьшается. См. подразд. 2.3.

158 Правильно, при емкостной нагрузке магнитный поток реакции якоря и магнитный поток индуктора совпадают по направлению.

159 С увеличением индуктивной нагрузки увеличивается размагничивающее действие реакции якоря. См. подразд. 2.3.

160 Укажите также смещение обмоток в электрических градусах.

161 При индуктивной нагрузке существует значительная продольная размагничивающая реакция якоря, которая растет с увеличением тока нагрузки, и поэтому напряжение уменьшается.

162 Правильно. Необходимо выполнение всех трех условий:  $U = \text{const}$ ,  $\cos\varphi = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ .

163 Уравнительный ток появляется в двух фазах, когда на параллельную работу включают синхронные генераторы, у которых различен порядок следования фаз.

164 Ошибочный ответ, необходимо воспользоваться формулой  $y = \tau = \frac{z}{2p}$ , затем прибавляем найденный шаг к номеру паза, в котором лежит начало катушки. См. подразд. 2.2.

165 Правильно. Неизвестно число полюсов генератора.

166 Это только одна из причин, вызывающих падение напряжения.

167 Правильно. Этот ток будет размагничивать один генератор и подмагничивать другой.

168 Чтобы поддерживать напряжение синхронного генератора постоянным при увеличении емкостной нагрузки, ток возбуждения надо уменьшать. См. подразд. 2.3.

169 Задачу можно решить, не обладая сведениями о частоте тока в обмотках якоря. См. подразд. 2.3.

170 Ротор может быть якорем, но может быть и индуктором. Чаще всего в синхронных генераторах ротор обычно является индуктором.

171 Ответ ошибочен. Воспользуйтесь формулой  $y = \tau = \frac{z}{2p} \dots$

172 Воспользуйтесь формулой  $E_{\text{витка ср}} = 4,44f\Phi$ , приняв  $w = 1$ .

173 Определите шаг обмотки и прибавьте его к номеру паза, в котором лежит начало фазы. См. пример 2.2.

174 Расчетная величина ЭДС генератора обеспечивается выбором размеров генератора, значений магнитной индукции, частоты вращения генератора и числа витков в катушке. См. подразд. 2.2.

175 Правильно.

176 Необходимо указать полный ответ.

177 Выполняем обмотку с паза 1. Для определения номера паза, в который следует уложить конец первой секции, к номеру паза, где находится начало секции, прибавляем  $y$ :  $1 + y = 1 + 12 = 13$ . См. пример 2.2.

178 Магнитное поле генератора уменьшается при увеличении индуктивной, а не емкостной нагрузки.

179 Магнитное поле увеличивается и искажается при активно-емкостной нагрузке. См. подразд. 2.3.

180 Только этого условия недостаточно. См. подразд. 2.3.

181 Правильно. Необходимо знать характер нагрузки.

182 Правильно, суммарное действие двух названных причин приводит к быстрому уменьшению напряжения при увеличении нагрузки.

183 Такой ток появится, если частоты генераторов не равны между собой. См. подразд. 2.3.

184 Помните, что векторы напряжений параллельно работающих генераторов должны быть сдвинуты по фазе на угол  $180^\circ$ . См. подразд. 2.3.

185 Правильно.

186 Правильно. При этом увеличивается и механическая мощность, поступающая от приводного двигателя к генератору.

187 Именно этот угол между осью полюсов и осью результирующего магнитного потока принято обозначать буквой  $\theta$ .

188 Перевозбужденный, а не недовозбужденный синхронный двигатель. См. подразд. 2.4.

189 Правильно.  $M = M_{\max} \sin \theta = M_{\max} \sin 30^\circ = \frac{1}{2} M_{\max}$ .

190 Правильно.

191 Для улучшения коэффициента мощности сети синхронные двигатели, присоединенные к ней, перевозбуждают. См. подразд. 2.4.

192 Потери на гистерезис являются одной из составляющих постоянных потерь синхронной машины.

193 Правильно. Эти потери изменяются при изменении нагрузки синхронной машины.

194 Изучите более внимательно рабочие характеристики синхронного двигателя, представленные на рисунке 2.23.

195 Перегрузочную способность  $k_n = \frac{M_{\max}}{M_n}$  можно определить, воспользовавшись формулой  $M = M_{\max} \sin \theta$ . См. подразд. 2.4.

196 Правильно.

197 Правильно. Этот угол обычно обозначают как  $\phi$ . См. подразд. 2.4.

198 Надо увеличить вращающий момент на валу приводного двигателя, а следовательно, и мощность, поступающую от приводного двигателя к генератору.

199 Воспользуйтесь формулой  $k_n = \frac{M_{\max}}{M_n}$  и  $M = M_{\max} \sin \theta$ .

200 В качестве синхронного компенсатора используется не генератор, а двигатель. См. подразд. 2.4.

201 Механические потери составляют часть постоянных потерь.

### 4.3 Раздел «Вентильно-индукторный двигатель»

202 Датчики положения ротора формируют сигналы обратной связи для системы управления. См. подразд. 3.1.

203 Преобразователь частоты обеспечивает питание фаз ИМ однополярными импульсами напряжения прямоугольной формы.

204 Правильно. Источник питания не принадлежит структурной схеме ВИД.

205 Система управления в соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет процессом электромеханического преобразования энергии.

206 Такое положение называется рассогласованным. См. подразд. 3.2.

207 Согласованным положением сердечников статора и ротора ИМ для какой-либо фазы называется такое положение, при котором зубцы фазы располагаются строго напротив полюсов ротора.

208 Правильно.

209 Воспользуйтесь формулой связи между частотой возбуждения фаз ИМ  $f$  и частотой вращения ротора  $n$ . См. подразд. 3.3.

210 Необходимо использовать формулу  $f = N_R n$ .

211 Правильно.  $f = N_R n / 60 = 4 \cdot 3000 / 60 = 200$  Гц.

212 Уравнение, описывающее связь между частотой возбуждения фаз ИМ  $f$  и частотой вращения ротора  $n$  при симметричной одиночной коммутации имеет вид  $f = N_R n / 60$ . См. подразд. 3.3.

213 Коэффициент электромагнитной редукции для случая несимметричной коммутации равен  $1/3$ . Используя уравнение  $k_{эп} = \Omega / \Omega_R$ , определим частоту вращения магнитного поля статора:

$$\Omega = \Omega_R / 3 = 3000 / 3 = 1000 \text{ об/мин.}$$

214 Правильно.

215 Воспользуйтесь определением для коэффициента электромагнитной редукции, который для случая несимметричной коммутации составляет  $k_{эп} = \Omega / \Omega_R$ . См. подразд. 3.3.

216 Магнитное поле в ВИД не может быть ни круговым, ни эллиптическим, ни даже пульсирующим в обычном понимании. Оно имеет сложный характер и в пределе стремится к дискретно-пульсирующему. См. подразд. 3.5.

217 В ВИД магнитное поле носит более сложный характер по сравнению с традиционными электрическими машинами, для описания характера данного магнитного поля применяется термин – дискретно-пульсирующее. См. подразд. 3.5.

218 Правильно.

219 Это одно из достоинств индукторной машины. См. подразд. 3.7.

220 Правильно. Для снижения уровня шумов и вибраций следует проектировать ВИД таким образом, чтобы резонансные частоты сердечника статора принимали как можно большие значения.

221 Низкие потери в роторе являются достоинством индукторной машины. См. подразд. 3.7

222 Обмотка на роторе отсутствует, поэтому в ВИД потери в роторе более низкие по сравнению с традиционными электрическими машинами.

223 Правильно. Подача напряжения на фазу ИМ осуществляется в положении, близком к рассогласованному.

224 Угол  $\gamma_1$  соответствует перекрытию полюсов статора и ротора. См. подразд. 3.4

225 Замедление роста тока на участке  $\gamma_1 < \gamma < \gamma_{off}$  или даже его снижение обусловлено режимом нарастанием противоЭДС. См. подразд. 3.4

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
(обязательное)

**Задания на выполнение контрольной работы по разделу  
«Двигатели постоянного тока»**

**Задача 1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения**

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: мощность на валу  $P_n$ , напряжение на зажимах двигателя  $U_n$ , частота вращения  $n_n$ , потери мощности в цепях якоря  $\Delta P_{ан}$ , коэффициент полезного действия  $\eta_n$ , процентное значение тока возбуждения  $i_{вн}\%$ . Необходимо:

1 Определить для номинального режима работы момент на валу двигателя  $M_n$ , ток якоря  $I_{ан}$ , ток обмотки возбуждения  $I_{вн}$  и ток, потребляемый из сети  $I_n$ .

2 Выбрать сопротивление пускового реостата  $R_{пуск}$  из условия, чтобы пусковой ток был в 2,5 раза больше номинального

3 Рассчитать и построить графики зависимостей  $n = f(I_a)$ ,  $n = f(M)$ ,  $\eta = f(I_a)$ .

4 Определить пределы изменения частоты вращения двигателя при регулировании добавочного сопротивления в цепи якоря от 0 до  $4 R_a$  и токе  $I_a = I_{ан}$ .

Числовые значения исходных величин выбираются из таблицы А.1.

**Таблица А.1 – Исходные данные к задаче 1**

Номер варианта	Тип двигателя	$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$\eta_n$ , %	$i_{вн}$ , %	$\Delta P_{ан}$ , Вт
1	П11	110	0,7	3000	73,5	10	100
2	П11	220	0,3	1500	64	9	80
3	П11	110	0,13	1000	59	10	50
4	П12	110	1,0	3000	76	9	120
5	П12	220	0,45	1500	70	8	75
6	П12	110	0,2	1000	65,5	12	40
7	П21	110	1,5	3000	76	8	200
8	П21	220	0,7	1500	74	10	80
9	П21	110	0,3	1000	80,5	5	32
10	П22	110	2,2	3000	80	9	200
11	П22	220	1,0	1500	76,5	8	145
12	П22	110	0,45	1000	72	10	75
13	П31	110	3,2	3000	83	6	250
14	П31	220	1,5	1500	78,5	10	160
15	П31	110	0,7	1000	75	7	120
16	2ПН90МУ	110	1,0	3000	86	5	60
17	2ПН90МУ	220	0,37	1500	66	14	87



Окончание таблицы А.1

Номер варианта	Тип двигателя	$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$\eta_n$ , %	$i_{ин}$ , %	$\Delta P_{ан}$ , Вт
18	2ПН90МУ	110	0,25	1500	75	7	40
19	2ПН90МУ	110	0,17	750	73	8	28
20	2ПН100МУ	220	2,0	3000	75	10	250
21	2ПН100МУ	110	0,75	1500	64	8	150
22	2ПН100МУ	110	0,5	1000	62	12	100
23	2ПН90ЛУ	220	1,3	3000	71	10	200
24	2ПН90ЛУ	110	0,55	1500	76	9	70
25	2ПН90ЛУ	220	0,34	1000	77	10	35
26	2ПН90ЛУ	110	0,2	750	67	7	34
27	Д12	220	2,5	1140	85	8	180
28	Д21	220	4,5	1030	82,5	5	400
29	Д21	220	5,5	1440	83	5	450
30	Д22	220	6,0	1100	85	4	470
31	П21	220	1,5	3000	75	4	141
32	П21	220	1,5	1500	78	5,3	166
33	П22	220	2,2	1500	83	5	156
34	П22	220	2,2	3000	80	2,5	153
35	П31	220	3,2	3000	83	4,4	180
36	Д21	220	4,5	1000	81	4,7	364
37	Д21	220	4,5	1500	80	3,8	465
38	Д21	220	4,5	3000	84	3,4	194
39	Д22	220	6,0	1500	82	5	469
40	Д22	220	6,0	1000	83	4,3	481
41	Д23	220	6,2	3000	85	2,4	374
42	Д23	220	6,6	2200	85,7	1,7	359
43		220	8,0	1000	84,5	3,4	562
44		220	9,0	1500	85	1,6	535
45		220	10,0	1000	72	4,1	1095
46		220	10,0	750	78,4	4	1104
47		220	12,5	1000	74,7	2,7	1297
48		220	14,0	750	80	3	1432
49		220	17,0	750	83	3,2	1272
50		220	19,0	600	81,5	4,7	2020
51		220	20,5	970	84,7	1,7	1005
52		220	25,0	750	83,5	3,6	1750
53		220	25,0	600	83	3,3	1918
54		220	32,0	750	87,6	3	2644
55		220	42,0	600	93,6	5	1852
56		220	55,0	600	87	2,4	2827
57		220	70,0	600	88	2,5	2500
58	П31	220	3,2	1500	79	6	308

## Задача 2. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения при номинальном режиме работы имеет: напряжение на зажимах двигателя  $U_n$ , мощность на валу  $P_n$ , частоту вращения  $n_n$ , потери мощности в обмотке якоря  $\Delta P_{ан}$  и в обмотке возбуждения  $\Delta P_{вн}$ , прочие потери мощности  $\Delta P_M$ .

Определить:

1 Мощность, потребляемую из сети  $P_{ин}$ , ток двигателя  $I_n$ , момент  $M_n$ .

2 Сопротивление якорной обмотки  $R_a$  и обмотки возбуждения  $R_b$ .

3 Построить зависимости частоты вращения якоря и момента от тока якоря, т.е.  $n = f(I_a)$  и  $M = f(I_a)$ . Используя указанные зависимости, рассчитать и построить механическую характеристику двигателя  $n = f(M)$ .

*Примечание* – При выполнении п. 3 воспользоваться зависимостью  $\phi\% = f(i_{в\%})$ , приведенной в таблице:

$\phi, \%$	5	26	48	70	90	100
$i_{в, \%}$	0	20	40	60	80	100

Числовые значения исходных величин выбираются из таблицы А.2.

Таблица А.2 – Исходные данные к задаче 2

Номер варианта	Тип двигателя	$P_n$ , Вт	$U_n$ , В	$n$ , об/мин	$\Delta P_{ан}$ , Вт	$\Delta P_{вн}$ , Вт	$\Delta P_M$ , Вт
1	МСП-0,25	250	30	1460	37	34	44
2	МСП-0,25	250	100	1700	29	15	56
3	МСП-0,25	550	200	3600	33	17	87
4	МСП-0,25	250	160	1700	44	24	32
5	МСП-0,15	150	30	850	27	21	62
6	МСП-0,15	150	110	850	35	22	65
7	МСП-0,15	150	160	850	27	25	65
8	МСП-0,1	100	30	1300	50	47	23
9	МСП-0,1	100	100	1500	26	26	18
10	МСП-0,1	100	160	1500	26	33	12
11	Д12	2500	220	1100	310	300	50
12	Д21	4500	220	900	650	560	90
13	Д22	6000	220	850	600	580	120
14	Д21	5500	220	1200	620	47	110
15	Д21	4000	440	1050	500	420	80
16	Д31	6700	440	800	650	620	130
17	Д22	7000	440	1180	660	600	140
18	Д31	8000	220	800	740	700	160
19	Д32	12000	220	675	650	550	240
20	Д41	16000	220	650	800	760	320
21	Д31	12000	220	1100	600	590	240
22	Д32	18000	220	960	1520	1480	360
23	Д41	15000	440	660	1400	1300	300

Окончание таблицы А.2

Номер варианта	Тип двигателя	$P_n$ , Вт	$U_n$ , В	$n$ , об/мин	$\Delta P_{ан}$ , Вт	$\Delta P_{вн}$ , Вт	$\Delta P_M$ , Вт
24	Д32	17000	440	970	1360	1300	340
25	Д806	22000	220	575	1660	1600	440
26	Д41	14000	220	970	1770	1680	480
27	Д806	32000	220	900	2160	2000	640
28	Д808	37000	220	525	2560	2200	740
29	Д808	37000	440	500	2500	2300	700
30	Д806	32000	4402	950	1800	1780	650
31		19000	20	600	2225	46	2042
32		10000	220	750	1201	67	1471
33		4500	220	1000	401	21	634
34		1500	220	1500	185	16	209
35		1500	220	3000	161	16	296
36		25000	220	600	2053	89	2798
37		14000	220	750	1523	62	1807
38		6000	220	1000	525	10	651
39		2200	220	1500	173	13	248
40		2200	220	3000	161	9	380
41		42000	220	600	845	30	6247
42		17000	220	750	1358	76	2048
43		8000	220	1000	606	13	792
44		3200	220	1500	349	11	491
45		3200	220	3000	197	13	445
46		55000	220	600	2965	165	5088
47		25000	220	750	1887	74	2980
48		10000	220	1000	1191	42	1346
49		4500	220	1500	503	3	584
50		4500	220	3000	208	13	636
51		70000	220	600	3414	156	5975
52		32000	220	750	571	1171	3467
53		12500	220	1000	1142	67	1423
54		6000	220	1500	520	8	789
55		6000	220	3000	392	8	873
56		6000	220	1000	576	9	823
57		8000	220	3000	836	11	733
58		11000	220	1500	1097	28	969
59		14000	220	1500	1571	325	289
60		19000	220	1500	1665	52	1769

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Данилов, И. А.** Электрические машины / И. А. Данилов, К. В. Лотоцкий. – М. : Колос, 1972. – 527 с.
- 2 **Копылов, И. П.** Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2000. – 606 с.
- 3 **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Машины постоянного тока и трансформаторы : учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.
- 4 **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Машины переменного тока : учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.
- 5 Сборник задач по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие для вузов / М. Ю. Анвельт [и др.]; под ред. В. С. Пантюшина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1979. – 253 с.
- 6 **Кузнецов, В. А.** Вентильно-индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
- 7 Нетрадиционная энергетика [Электронный ресурс] / Форум по малым альтернативным источникам энергии. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://alter-energo.ru/topic1828.html>. – Дата доступа: 23.12.2014.
- 8 Электромонтер. Инфо [Электронный ресурс] / Справочник. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://www.electromonter.info/handbook/09/DC>. – Дата доступа: 23.12.2012.
- 9 Синхронные машины [Электронный ресурс] / Принцип действия синхронного генератора. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://www.feklistovstudio.narod.ru/1principdsinhr.html>. – Дата доступа: 23.12.2012.
- 10 Спецтехника и оборудование [Электронный ресурс] / Двигатель постоянного тока. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://xn----itbb1bjjwe.xn--p1ai/poleznaya-informaciya/dvigatel-postoyannogo-toka.html>. – Дата доступа: 23.12.2012.
- 11 Бесщёточный двигатель. [Электронный ресурс] / Вентильный электродвигатель. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=nGrXTokodPk>. – Дата доступа: 23.12.2012.
- 12 Двухмашинный агрегат и тахогенераторы [Электронный ресурс] / Особенности устройства и характеристики возбудителей. – Гомель, 2015. – Режим доступа: [http://pomogala.ru/teplovoz/teplovoz\\_27.html](http://pomogala.ru/teplovoz/teplovoz_27.html). – Дата доступа: 7.03.2015.
- 13 Принцип действия генератора постоянного тока [Электронный ресурс] / Упрощенная модель генератора постоянного тока. – Гомель, 2015. – Режим доступа: <http://el-mashin.narod.ru/text/121.html>. – Дата доступа: 7.03.2015.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	3
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА</b> .....	6
1.1 Конструкция и принцип действия машин постоянного тока.....	6
1.2 Обмотки якоря и их ЭДС.....	13
1.2.1 Простая петлевая обмотка.....	14
1.2.2 Простая волновая обмотка.....	19
1.2.3 Магнитный поток, ЭДС и электромагнитный момент.....	23
1.3 Реакция якоря. Коммутация.....	24
1.3.1 Магнитное поле обмотки якоря.....	24
1.3.2 Коммутация. Способы улучшения коммутации.....	25
1.4 Генераторы постоянного тока.....	27
1.5 Двигатели постоянного тока.....	31
1.6 Пуск, реверсирование и торможение двигателей.....	43
1.7 Потери мощности и коэффициент полезного действия машин постоянного тока.....	45
1.8 Программа самоконтроля по разделу «Машины постоянного тока».....	47
<b>2 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ</b> .....	<b>53</b>
2.1 Применение, классификация и устройство синхронных машин.....	53
2.2 Обмотки машин переменного тока.....	55
2.2.1 Основные элементы и определения.....	55
2.2.2 ЭДС витка обмотки статора синхронного генератора.....	56
2.2.3 Однофазные однослойные обмотки.....	57
2.2.4 Трехфазные однослойные обмотки.....	60
2.3 Синхронный генератор.....	63
2.3.1 Принцип действия синхронного генератора.....	63
2.3.2 Реакция якоря синхронного генератора.....	65
2.3.3 Характеристики синхронного генератора.....	67
2.3.4 Параллельная работа синхронных генераторов с сетью.....	68
2.3.5 Регулирование активной и реактивной мощности синхронных генераторов.....	72
2.4 Синхронный двигатель и компенсатор.....	73
2.4.1 Момент синхронного двигателя.....	73
2.4.2 Рабочие характеристики синхронного двигателя.....	75
2.4.3 Пуск синхронного двигателя.....	76
2.4.4 Синхронный компенсатор.....	77
2.5 Программа самоконтроля по разделу «Синхронные машины».....	80
<b>3 ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ</b> .....	<b>84</b>

3.1 Структурная схема вентильно-индукторного двигателя.....	85
3.2 Принцип действия ВИД.....	86
3.3 Алгоритмы коммутации фаз.....	90
3.4 Кривые тока фаз ИМ.....	92
3.5 Магнитное поле в ИМ.....	93
3.6 Кривая изменения мгновенного момента фазы ВИД.....	95
3.7 Достоинства и недостатки ВИД.....	96
3.8 Программа самоконтроля по разделу «Вентильно-индукторный двигатель».....	97
<b>4 КОНСУЛЬТАЦИИ ПО ПРОГРАММАМ САМОКОНТРОЛЯ.....</b>	<b>99</b>
4.1 Раздел «Машины постоянного тока».....	99
4.2 Раздел «Синхронные машины».....	105
4.3 Раздел «Вентильно-индукторный двигатель».....	109
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> Задания на выполнение контрольной работы по разделу «Двигатели постоянного тока».....	111
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>115</b>

Учебное издание

*ГАЛУШКО Виктор Николаевич*  
*ПАЦКЕВИЧ Валерий Анатольевич*

**ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ Виктор Георгиевич**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

Часть II

### **Машины постоянного тока. Синхронные машины**

Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы  
студентов механического факультета

Редактор И. И. Э в е н т о в

Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а

Подписано в печать 27.11.2015 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 7,25. Тираж 300 экз.  
Зак. № . Изд. № 84.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014.  
№ 2/104 от 01.04.2014.  
Ул. Кирова, 34, 246653 г. Гомель