

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

В. П. УМНОВ А. М. ШАРАПОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ:
ТЕОРИЯ, УСТРОЙСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ
В АВТОМОБИЛЯХ

Учебное пособие



Владимир 2020

УДК 621.313:629.33

ББК 39.33-04

У54

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры вычислительной техники и систем управления
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
С. И. Лиходеев

Кандидат технических наук, доцент
руководитель направления «Электронные системы»
ООО «НПК «АВТОПРИБОР»»
Р. В. Родионов

Умнов, В. П. Электрические машины и аппараты: теория,
У54 устройство и применение в автомобилях : учеб. пособие / В. П. Умнов,
А. М. Шарапов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. –
Владимир : Изд-во ВлГУ, 2020. – 308 с.
ISBN 978-5-9984-0946-2

Изложены основные сведения по теоретическим основам электрических машин и аппаратов. Приведен необходимый математический аппарат и иллюстрационный материал. Рассмотрены вопросы устройства электрических машин и аппаратов и особенности их работы, конструктивные решения и особенности применения электрических машин и аппаратов в автомобилях. Представлены практические задания по части электрических машин с использованием компьютерного моделирования.

Предназначено для студентов направлений 13.03.02 «Электротехника и электроэнергетика»; профиль «Элементы и системы электрического оборудования автомобилей и тракторов» и 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 20. Ил. 218. Библиогр: 24 назв.

УДК 621.313:629.33

ББК 39.33-04

ISBN 978-5-9984-0946-2

© ВлГУ, 2020

© Умнов В. П., Шарапов А. М., 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АВТОМОБИЛЯХ.....	8
1.1. Основные понятия и определения, классификация электрических машин	8
1.2. Электрические машины как электромеханические преобразователи энергии. Применение электрических машин в автомобилях	11
Глава 2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	13
2.1. Основные физические законы и правила для электрических машин. Элементарный генератор и элементарный двигатель.....	13
2.2. Преобразование энергии в электрической машине. Вихревые токи	17
Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ...	20
3.1. Общие сведения о машинах постоянного тока	20
3.2. Устройство и работа электрической машины постоянного тока	21
3.3. Магнитная и электрические цепи машин постоянного тока	26
3.4. Реакция якоря машины постоянного тока	30
3.5. Коммутация ветвей обмотки машин постоянного тока	34
3.6. Возбуждение магнитного поля в машинах постоянного тока Механические характеристики и режимы работы двигателей.....	40
3.7. Регулирование координат двигателя постоянного тока.....	47
Практические задания к разделу 3	55
Глава 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В АВТОМОБИЛЯХ	74
4.1. Стартер автомобиля	74
4.1.1. Устройство и работа стартера	74
4.1.2. Основные расчетные зависимости работы стартера	78
4.2. Электропривод стеклоочистителей автомобиля	80
4.2.1. Устройство типовых стеклоочистителей	80

4.2.2. Нагрузки на привод стеклоочистителя ветрового стекла и его моделирование	88
4.3. Привод электроусилителя руля автомобиля	102
4.4. Электропривод стеклоподъёмника автомобиля.....	106
Глава 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА..	111
5.1. Общие сведения о машинах переменного тока и их устройстве	111
5.2. Вращающееся магнитное поле в машинах переменного тока ...	118
5.3. Асинхронный двигатель	120
5.4. Устройство и возбуждение синхронных генераторов.....	126
5.5. Синхронный двигатель	140
Практические задания к разделу 5	144
Глава 6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ	153
6.1. Шаговый двигатель	153
6.2. Гистерезисный двигатель	160
6.3. Синхронный реактивный и вентильный индукторный двигатели.....	163
Глава 7. ТРАНСФОРМАТОРЫ	169
7.1. Устройство и принцип действия трансформаторов	169
7.2. Классификация и основные компоненты трансформаторов	172
Практическое задание к разделу 7	176
Глава 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ И УСТРОЙСТВА С МАШИНАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СПЕЦИАЛЬНЫМИ СИНХРОННЫМИ МАШИНАМИ В АВТОМОБИЛЯХ	181
8.1. Тяговый привод электромотоцикла	181
8.2. Автомобильный вентильный генератор	189
8.3. Бесколлекторный привод дроссельной заслонки автомобиля ...	202
Глава 9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АВТОМОБИЛЯХ.....	211
9.1. Основные понятия и определения, классификация электрических аппаратов	211

Глава 10. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ	217
10.1. Тепловые процессы в электрических аппаратах	217
10.1.1. Источники теплоты в электрических аппаратах	218
10.1.2. Анализ способов распространения теплоты в электрических аппаратах	219
10.1.3. Режимы работы электрических аппаратов	220
10.2. Контактные явления в электрических аппаратах	223
10.2.1. Классификация электрических контактов	223
10.2.2. Контактная поверхность и контактное сопротивление	224
10.2.3. Зависимость переходного сопротивления от свойств материала контактов	227
10.2.4. Влияние переходного сопротивления контактов на нагрев проводников	228
10.2.5. Сваривание электрических контактов	230
10.2.6. Износ контактов	230
10.3. Основные материалы, применяемые в электрических аппаратах	232
10.3.1. Общие сведения о материалах	232
10.3.2. Материалы для контактных соединений	233
Глава 11. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	237
11.1. Коммутация электрической цепи	237
11.2. Отключение электрической цепи контактными аппаратами ...	238
11.3. Электрическая дуга	240
11.3.1. Статическая вольтамперная характеристика электрической дуги постоянного тока	244
11.3.2. Динамическая вольтамперная характеристика электрической дуги постоянного тока	246
11.3.3. Условия гашения дуги постоянного тока	247
Глава 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АВТОМОБИЛЯХ	249
12.1. Выключатели	250
12.1.1. Выключатель зажигания	253
12.1.2. Выключатель аварийной сигнализации	259
12.1.3. Выключатель аккумуляторной батареи	263
12.2. Втягивающее реле электростартера	265

12.3. Электрическое реле	269
12.3.1. Замыкающее реле	274
12.3.2. Размыкающее реле	276
12.3.3. Переключающее реле.....	276
12.3.4. Реле с задержкой включения/выключения	277
12.3.5. Реле с диодом	278
12.3.6. Реле с резистором	279
12.4. Защитная коммутационная аппаратура	279
12.4.1. Плавкие предохранители	279
12.4.2. Автоматы-прерыватели	285
12.4.3. Термобиметаллические предохранители	289
12.4.4. Позисторы	295
12.5. Блок розжига газоразрядных ламп	297
12.6. Датчик включения вентилятора	299
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	305
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	306

ВВЕДЕНИЕ

Один из основных видов электрического оборудования – электрические машины, которые служат для преобразования механической энергии в электрическую и обратно – электрической энергии в механическую, а также для преобразования одного рода электрической энергии в другой. Преобразование механической энергии в электрическую осуществляется с помощью электрических машин, называемых электрическими генераторами.

Генераторы приводятся во вращение с помощью паровых, гидравлических и газовых турбин, двигателей внутреннего сгорания и других первичных двигателей. Электрические двигатели сегодня являются основным устройством, приводящим в движение механизмы роботов, мехатронных модулей, станков и многих других технических устройств. Машины переменного тока бывают однофазные и многофазные (чаще всего трехфазные); первые генерируют или потребляют однофазный ток, вторые – многофазный. Машины постоянного тока, как правило, снабжаются коллектором, который здесь служит для получения на щетках машины электродвижущей силы (ЭДС), постоянно действующей в одном направлении.

В современном автомобиле это в первую очередь мощный электромотор стартера, привод электроусилителя руля, двигателя, приводящие во вращение вентиляторы радиатора и климатической установки, стеклоочистители и другие устройства. Для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты, управления и регулирования различных установок, предназначенных для передачи, преобразования, распределения и потребления потоков энергии, используются электрические аппараты. При этом речь может идти о потоках энергии различного вида: электрической, механической, тепловой и др. Потоками тепловой энергии можно управлять при помощи электромагнитных клапанов и заслонок. Большое количество различных аппаратов применяется в современных автомобилях.

Учитывая мировую тенденцию увеличения числа электронных систем управления современного автомобиля, можно с уверенностью утверждать, что электрические аппараты – важная, неотъемлемая часть этих систем. Именно от их надежной работы зависят безопасность автомобиля и его экологические показатели.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АВТОМОБИЛЯХ

1.1. Основные понятия и определения, классификация электрических машин

Электрической машиной принято считать электромеханическое устройство, способное преобразовать механическую энергию в электрическую и обратно. В первом случае происходит выработка электроэнергии (машины являются генераторами), во втором – её потребление (электродвигатели). Последние необходимы для того чтобы привести в движение транспортные средства, станки и другие механизмы. Генераторы и электродвигатели – основная сфера использования электрических машин. Но они могут быть также использованы и в качестве электромеханических преобразователей (умформеров) – агрегатов, которые способны преобразовывать электрическую энергию в различные её формы. Электрические машины применяются также для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный), частоты и числа фаз переменного тока, постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения. Такие машины называются электромашинными преобразователями. Преобразователь постоянного тока в переменный называется инвертором, увеличитель мощности электрических сигналов – электромашинным усилителем, а устройство способное отрегулировать напряжение переменного тока – индукционным регулятором. Синхронные компенсаторы – тип электрических машин, применяемых для увеличения КПД потребителей электрической энергии. Индукционные регуляторы, принимающие участие в регулировании напряжения переменного тока, также относят к электрическим машинам. В различных устройствах автоматики и вычислительной техники применяют большое разнообразие электрических микромашин, которые используются не только как двигатели, но и как тахогенераторы (преобразование скорости вращения ротора двигателя в электрический сигнал), вращающиеся трансформаторы (получение электрических сигналов в зависимости от угла поворота вала), сельсины и т. п. К электрическим машинам относят также трансформатор. Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат, который служит для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения, но той же частоты. Хотя он и не является машиной (не имеет движущихся ча-

стей), все же его теория изучается вместе с теорией электрических машин, так как основные соотношения между величинами, характеризующими рабочий процесс трансформатора, применимы и к электрическим машинам.

Электрическая машина имеет две основные части — вращающуюся, называемую ротором, и неподвижную, называемую статором. Различают машины переменного и постоянного тока в зависимости от того, какой ток они генерируют или потребляют. Машины переменного тока разделяются на синхронные и асинхронные. В тех и других машинах при их работе возникает вращающееся магнитное поле. Ротор синхронной машины вращается со скоростью, равной скорости вращения магнитного поля. Скорость вращения ротора асинхронной машины отличается от скорости вращения поля.

Машины переменного тока бывают однофазные и многофазные (чаще всего трехфазные); первые генерируют или потребляют однофазный ток, вторые — многофазный ток. Машины постоянного тока, как правило, снабжаются коллектором, который здесь служит для получения на щетках машины электродвижущей силы (э. д. с.), постоянно действующей в одном направлении. В то же время коллектор служит для переключения токов в частях обмотки ротора (якоря) таким образом, чтобы результирующая электромагнитных сил, получающихся от взаимодействия магнитного поля электромагнитов статора и токов в обмотке ротора, действовала на ротор все время в одном направлении. Находят себе применение также асинхронные коллекторные машины переменного тока. Их ротор выполняется так же, как ротор машины постоянного тока. Они в отличие от бесколлекторных асинхронных машин позволяют плавно и экономично регулировать их скорость вращения. Однако область их применения весьма ограничена вследствие их высокой стоимости, сложности ухода за ними и относительно малой надежности в работе. Все электрические машины можно разделить по принципу действия на две категории: коллекторные и бесколлекторные. Преобладающее большинство коллекторных машин работают на постоянном токе в роли двигателей или генераторов. Машины таких типов только небольшой мощности изготавливают универсальными, имеющие возможность работать как на постоянном, так и на переменном токе. Машины одной категории могут отличаться друг от друга схемой включения либо другими факторами, влияющие на характеристики этих машин. К примеру, асинхронные двигатели могут

быть трехфазными, однофазными или конденсаторными. Асинхронные машины по конструкции ротора бывают с фазным ротором и с короткозамкнутым ротором. Синхронные, а также работающие на постоянном токе коллекторные машины по способу создания магнитного поля разделяются на машины с постоянными магнитами и машины с обмоткам возбуждения. На рис. 1.1 представлен вариант классификации электрических машин.

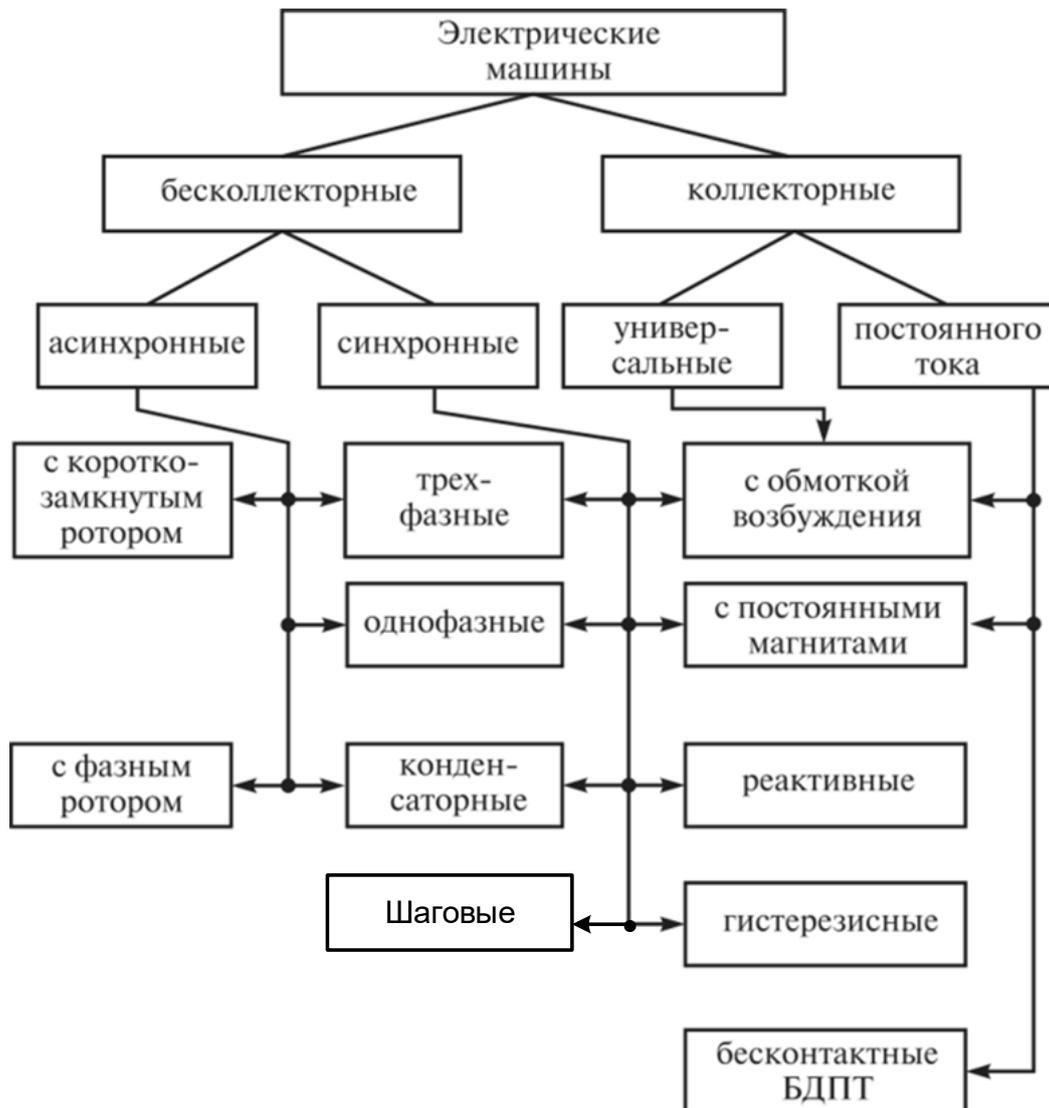


Рис. 1.1. Вариант классификации электрических машин

Приведенная краткая практическая классификация электрических машин не охватывает всего их многообразия. В дальнейшем при рассмотрении машин, используемых в автотранспорте, мы будем обращаться к различным их видам, различающимся как по назначению, так и по выполнению.

1.2. Электрические машины как электромеханические преобразователи энергии. Применение электрических машин в автомобилях

Приведем три основных постулата, характеризующих электрические машины как электромеханические преобразователи энергии.

1. Любая электрическая машина обратима, то есть может работать в режиме двигателя или генератора. Принцип обратимости был установлен российским академиком Э.Х.Ленцем в 1833 г. Если к валу машины подводить механическую энергию (вращать ротор), то в машине она может быть преобразована в электрическую энергию — машина будет работать как генератор. Наоборот, если к обмотке той же машины подвести электрический ток, то электрическая энергия будет преобразовываться в механическую и машина будет работать в качестве двигателя. Однако обычно каждая машина предназначена для работы в одном основном режиме, в котором обеспечивается ее наилучшее использование.
2. Преобразование энергии в электрических машинах всегда происходит с её потерями. То есть к.п.д. машины всегда меньше 100 процентов.
3. Электромеханическое преобразование энергии осуществляется полями ротора и статора, неподвижными друг относительно друга, в установившемся режиме.

Поскольку в 12, 24 или 36 - вольтовой сети автомобиля используется постоянный ток, то и двигатели на его борту – постоянного тока. Это в первую очередь мощный электромотор стартера, привод электроусилителя руля, двигатели, приводящие во вращение вентиляторы радиатора и климатической установки, стеклоочистители. Маленькие моторчики размещены в актуаторах центрального замка, в приводах зеркал, сервомеханизмах регулировок сидений и руля, в насосе омывателя стекол. Достоинства электродвигателей постоянного тока автомобильного назначения заключаются в компактности и большом крутящем моменте с самых малых оборотов, недостатки – в ограниченной мощности и моменте, а также в наличии коллекторно-щеточного узла, который имеет ограниченный ресурс. Двигатели переменного тока обычно применяются там, где нужна большая мощность и высокая надежность. Эти электрические машины обычно конструктивно проще и долговечнее агрегатов постоянного тока. Именно такие двигатели используются как тяговые в большинстве электромобилей и гибридах. В

качестве тягового электродвигателя используют трехфазные синхронные или асинхронные электрические машины переменного тока мощностью от 15 до 200 и более кВт. В сравнении с ДВС электродвигатель имеет высокую эффективность и меньшие потери энергии. КПД электродвигателя составляет 90% против 25% у ДВС. Основными преимуществами электродвигателя являются:

- реализация максимального крутящего момента во всем диапазоне скоростей;
- возможность работы в двух направлениях без дополнительных устройств;
- простота конструкции, воздушное охлаждение;- возможность работы в режиме генератора.

Однако для того, чтобы запитать двигатель переменного тока от батареи, на борту нужен специальный преобразователь тока – простой и недешевый инвертор, но его применение оправдано. Кроме того, одна электрическая машина переменного тока есть и в каждом обычном автомобиле – это генератор. Чтобы согласовать ток такого генератора с автомобильной бортовой сетью, применяется встроенный выпрямитель.

Электродвигатель с механизмом передачи механической энергии и схемой управления электродвигателем образуют систему электропривода автомобиля. Для передачи энергии в автомобильном электроприводе используются зубчатые и червячные передачи, кривошипно-шатунные механизмы. Часто электродвигатель и механизм передачи механической энергии объединяют в моторредуктор или электродвигатель совмещают с исполнительным элементом. Электроприводы автомобиля приводят в действие вентиляторы отопителей и системы охлаждения двигателя, стеклоподъемники, устройства выдвижения антенн, стеклоочистители, насосы омывателей, фарочистители, подогреватели, топливные насосы и другие агрегаты.

Вопросы для самопроверки к главе 1:

1. Что такое генератор?
2. Что такое электрический двигатель?
3. Чем отличаются машины постоянного и переменного тока?
4. Что означает обратимость электрических машин?
5. Почему к.п.д. электрических машин меньше 100%?
6. Где в автомобиле используются электрические машины?
7. Назовите виды и типы электрических машин.

Глава 2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

2.1. Основные физические законы и правила для электрических машин. Элементарный генератор и элементарный двигатель

Важнейшим законом, проявляющимся во всех электрических машинах, является закон электромагнитной индукции. Электромагнитная индукция — явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него. Электромагнитная индукция была открыта Майклом Фарадеем 29 августа 1831 года. Он обнаружил, что электродвижущая сила (ЭДС), возникающая в замкнутом проводящем контуре, пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. Величина электродвижущей силы не зависит от того, что является причиной изменения потока — изменение самого магнитного поля или движение контура (или его части) в магнитном поле. Современное математическое представление закона электромагнитной индукции в дифференциальной и интегральной форме получено Джеймсом Кларком Максвеллом — основоположником электродинамики.

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея (в СИ):

$$e = - \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (2.1)$$

где e — электродвижущая сила, действующая вдоль произвольно выбранного контура, Φ_B — магнитный поток через поверхность, натянутую на этот контур.

В интегральном виде закон электромагнитной индукции записывается следующим образом:

$$e = - \iint_S \vec{B} \cdot \vec{S} \, dS, \quad (2.2)$$

где B — величина индукции в данной точке магнитного поля, s — площадь поверхности контура.

Знак «минус» в выражениях (2.1) и (2.2) отражает правило Ленца: индукционный ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре, имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует тому изменению магнитного потока, которым был вызван данный ток.

Для катушки, находящейся в переменном магнитном поле, закон Фарадея можно записать следующим образом:

$$e = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (2.3)$$

где e — электродвижущая сила, N — число витков катушки, Φ_B — магнитный поток через один виток, Ψ — потокосцепление катушки.

Правило Ленца носит обобщённый характер и справедливо в различных физических ситуациях, которые могут отличаться конкретным физическим механизмом возбуждения индукционного тока. Так, если изменение магнитного потока вызвано изменением площади контура (например, за счёт движения одной из сторон прямоугольного контура), то индукционный ток возбуждается силой Лоренца, действующей на электроны перемещаемого проводника в постоянном магнитном поле. Если же изменение магнитного потока связано с изменением величины внешнего магнитного поля, то индукционный ток возбуждается вихревым электрическим полем, появляющимся при изменении магнитного поля. Однако в обоих случаях индукционный ток направлен так, чтобы скомпенсировать изменение потока магнитного поля через контур.

Вследствие закона электромагнитной индукции в простейшем случае в проводнике, помещенном в однородное магнитное поле, образованное двумя магнитами, и перемещаемом ортогонально силовым линиям магнитного поля с линейной скоростью V , индуцируется ЭДС, величина которой определяется по выражению

$$e = B \cdot V \cdot l, \quad (2.4)$$

где l — активная длина проводника, то есть часть проводника, находящаяся в пересекаемом магнитном поле. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки (рис. 2.1), причем следует иметь в виду, что это правило дается для определения направления ЭДС в проводнике, перемещающемся относительно магнитного поля.

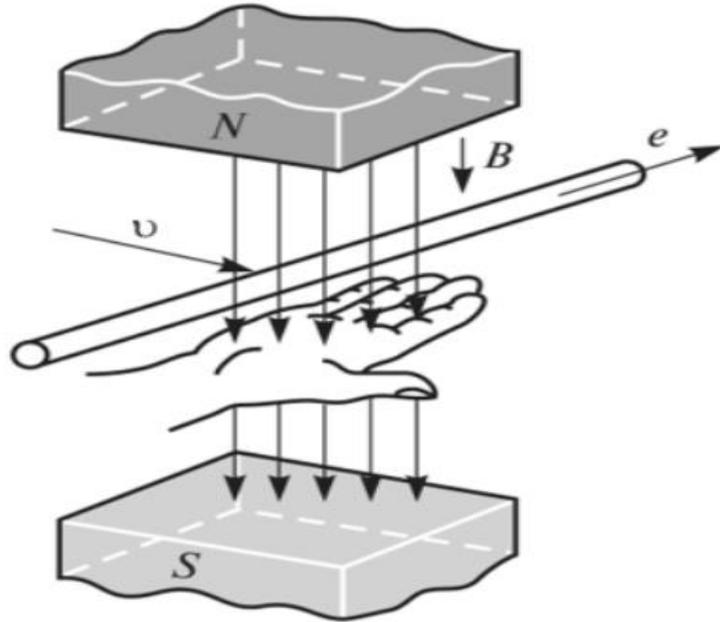


Рис. 2.1. Правило правой руки определения направления ЭДС

Отметим важное обстоятельство: ЭДС в проводнике может индуцироваться при перемещении проводника относительно силовых линий магнитного поля (так, чтобы они пересекались проводником), при перемещении магнитного поля относительно неподвижного либо движущегося с другой скоростью проводника, либо при изменении магнитного потока поля при неподвижных проводнике и поле. Под действием ЭДС заряженные частицы в проводнике (свободные электроны или ионы) будут перемещаться от одного конца проводника к другому и если концы проводника соединить проводящим элементом (подключить нагрузку), то образуется замкнутый контур, по которому потечёт ток, и мы получим элементарный генератор.

Другим не менее важным законом, действующим почти во всех электрических машинах является закон Ампера. Этот закон был впервые сформулирован в 1820 году Андре Мари Ампером. Из него следует, что два расположенные параллельно проводника, по которым проходит электрический ток, притягиваются, если направления токов совпадают, а если ток течёт в противоположных направлениях, то проводники отталкиваются. Взаимодействие здесь происходит посредством магнитного поля, которое возникает при движении заряженных частиц. Если поместить проводник с током во внешнее магнитное поле, то магнитное поле проводника с током будет искривлять силовые линии внешнего магнитного поля, и оно будет стремиться

вытолкнуть проводник, то есть устранить причину искривления его силовых линий.

Закон Ампера устанавливает, что в простейшем случае на проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле, действует сила, пропорциональная силе тока i , длине проводника l и индукции магнитного поля B . Под действием этой силы проводник начнет перемещаться и мы получим элементарный двигатель.

Соотношение между указанными выше величинами имеет вид:

$$F = B \cdot i \cdot l \sin \alpha , \quad (2.5)$$

где F - сила Ампера или электромагнитная сила (сила, с которой проводники отталкиваются или притягиваются), B - магнитная индукция, i - сила тока (мгновенное значение), l - активная длина проводника, α - угол между направлением тока и направлением магнитной индукции. Эта формула закона Ампера справедлива для прямолинейного проводника и однородного поля.

Для определения направления силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле, применяется правило левой руки (рис. 2.2)

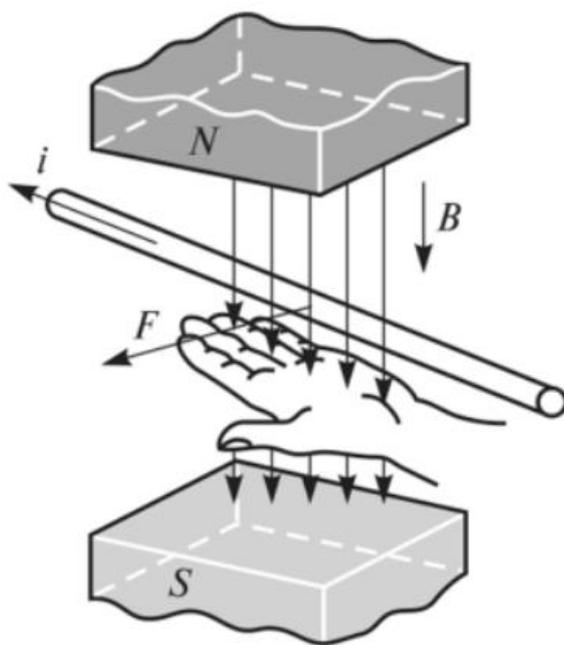


Рис. 2.2. Правило левой руки определения направления действия электромагнитной силы

Отметим, что поскольку в проводнике элементарного генератора течет ток, то на основании закона Ампера на него будет действовать электромагнитная сила, а в перемещающемся проводнике элементарного двигателя в соответствии с законом электромагнитной индукции возникнет ЭДС, противодействующая протекающему току (ЭДС самоиндукции или противои-ЭДС).

2.2. Преобразование энергии в электрической машине. Вихревые токи

Внешнее магнитное поле может создаваться постоянными магнитами или током, протекающим в электрическом контуре. Если внешнее магнитное поле, пронизывающее неподвижный электрический контур, создаётся током, текущим в другом контуре, то индукционный ток может оказаться направлен как в том же направлении, что и внешний, так и в противоположном: это зависит от того, уменьшается или увеличивается внешний ток. Если внешний ток увеличивается, то растёт создаваемое им магнитное поле и его поток, что приводит к появлению индукционного тока, уменьшающего это увеличение. В этом случае индукционный ток направлен в сторону, противоположную основному. В обратном случае, когда внешний ток уменьшается со временем, уменьшение магнитного потока приводит к возбуждению индукционного тока, стремящегося увеличить поток, и этот ток направлен в ту же сторону, что и внешний ток.

При равномерном движении проводника в элементарном генераторе на рис. 2.1 к нему должна быть извне приложена механическая сила F_m , равная электромагнитной силе F , т. е.

$$F = F_{\text{ЭМ}}. \quad (2.6)$$

Если умножить обе части равенства сил на скорость V , то получим равенство мощностей

$$F \cdot V = F_m \cdot V. \quad (2.7)$$

Подставляя в правую часть этого равенства F из (2.2) и V из (2.1), получим:

$$F_m \cdot V = e \cdot i. \quad (2.8)$$

Отсюда видим, что механическая мощность $F_m V$ в нашем элементарном генераторе преобразуется в электрическую мощность $e i$. Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь таким генератором, может быть найдена из уравнения напряжений

$$u = e - i \cdot r, \quad (2.9)$$

где u — напряжение на зажимах внешнего сопротивления; $i r$ — падение напряжения в проводнике, имеющем сопротивление r .

Умножив это уравнение на i , получим:

$$u \cdot i = e \cdot i - i^2 \cdot r, \quad (2.10)$$

где $u \cdot i$ — электрическая мощность, отдаваемая проводником во внешнюю цепь (она является частью полной электрической мощности $e \cdot i$, полученной в результате преобразования механической мощности); $i^2 \cdot r$ — электрические потери в проводнике.

Подведем к проводнику напряжение u так, чтобы ток i в проводнике имел указанное на рис. 2.2 направление. При этом возникнет электромагнитная сила, которая согласно правилу левой руки заставит проводник передвигаться влево. В проводнике появится ЭДС e , направленная против тока i и против напряжения u , в чем можно убедиться при помощи правила правой руки. Следовательно, напряжение u должно уравновесить ЭДС e и падение напряжения в проводнике $i \cdot r$, то есть

$$u = e + i \cdot r. \quad (2.11)$$

От уравнения напряжений (2.11), умножив его на i , перейдем к уравнению мощностей:

$$u \cdot i = e \cdot i + i^2 \cdot r. \quad (2.12)$$

В этом уравнении $i^2 \cdot r$ — электрические потери в проводнике, $e \cdot i$ — та часть подведенной электрической мощности $u \cdot i$, которая преобразуется в механическую мощность $F_m \cdot V$, так как, учитывая (2.1) и (2.2), мы можем написать:

$$e \cdot i = B \cdot l \cdot v \cdot i = F_m \cdot V. \quad (2.13)$$

Приведенные соотношения показывают, что электрическая машина обратима, т. е. может работать и генератором и двигателем.

Если массивный проводник поместить в переменное магнитное поле, то в этом проводнике благодаря явлению электромагнитной индукции возникают вихревые индукционные токи, называемые токами Фуко. Вихревые токи возникают также при движении массивного проводника в постоянном, но неоднородном в пространстве магнитном поле (рис. 2.3).

Токи Фуко имеют такое направление, что действующая на них в магнитном поле сила тормозит движение проводника. Маятник в виде сплошной металлической пластинки из немагнитного материала, совершающий колебания между полюсами электромагнита, резко останавливается при включении магнитного поля.

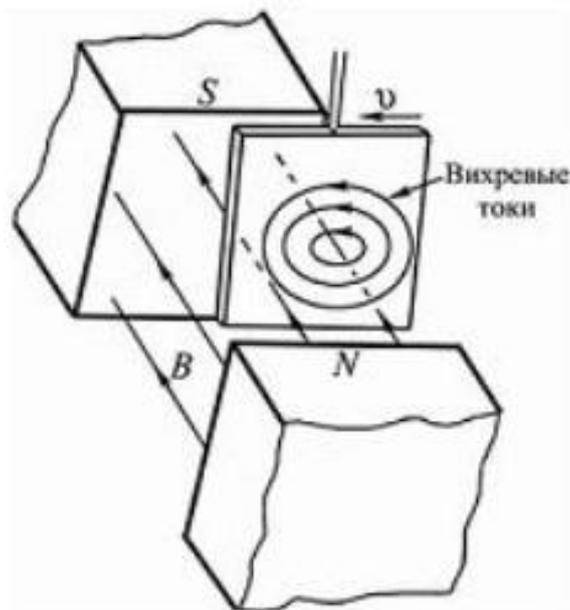


Рис. 2.3. Схема возникновения вихревых токов

Во многих случаях нагревание, вызываемое токами Фуко, оказывается вредным, и с ним приходится бороться. Сердечники трансформаторов, роторы электродвигателей набирают из отдельных железных пластин, разделенных слоями изолятора, препятствующего развитию больших индукционных токов, а сами пластины изготовляют из сплавов, имеющих высокое удельное сопротивление.

Вопросы для самопроверки к главе 2:

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея
2. Что необходимо для выполнения закона электромагнитной индукции?
3. Сформулируйте закон Ампера

4. Как определяется направление индуцируемой ЭДС?
5. Как определяется направление индукционного тока?
6. Что такое ЭДС самоиндукции?
7. Как выполняется третий закон Ньютона в электрической машине?
8. В чем заключается правило Ленца?
9. Когда возникает вихревой электрический ток?

Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Общие сведения о машинах постоянного тока

Машины постоянного тока широко используются в электрических установках в качестве двигателей и генераторов. Их мощность колеблется в пределах от долей кВт до 10 МВт и выше. Напряжение машин постоянного тока не превосходит обычно нескольких тысяч вольт. Наибольшее распространение имеют машины, напряжение которых не превышает 1 кВ. Скорость вращения машин постоянного тока колеблется в весьма широких пределах: от нескольких десятков до нескольких тысяч оборотов в минуту. Двигатели постоянного тока (ДПТ) широко применяются в качестве тяговых в транспортных средствах: на электровозах, тепловозах, в пригородных электропоездах, метрополитене, трамвае, троллейбусе, электрокарах, морских и речных судах. Крановые двигатели постоянного тока часто применяются в приводе различных подъемных устройств. С помощью мощных двигателей постоянного тока (до 12 МВт) приводятся в действие прокатные станы. Крупные двигатели постоянного тока приводят во вращение гребные винты на судах. В подавляющем большинстве автомобилей, тракторов, самолетов и других летательных аппаратов, имеющих систему электропитания на постоянном токе, все вспомогательные устройства приводятся в действие двигателями постоянного тока. Основное преимущество ДПТ по сравнению с асинхронными и синхронными переменного тока – возможность плавного и экономичного регулирования их скорости вращения в широких пределах и отсутствие ограничивающего верхнего предела 3000 об/мин, существующего в бесколлекторных двигателях переменного тока при 50 Гц. Генераторы постоянного тока (ГПТ) находят применение в промышленности для питания электропривода постоянного тока, в

установках проводной и радиосвязи, авто- и авиатранспорте. Питание обмоток возбуждения синхронных генераторов осуществляется во многих случаях от генераторов постоянного тока (возбудителей). Широко также распространены ГПТ специального исполнения, обладающие особыми свойствами (сварочные, генераторы для освещения поездов, электромашинные усилители постоянного тока и пр.).

Основные недостатки машин постоянного тока: относительно высокая стоимость (ДПТ в 2...3 раза дороже, чем асинхронные короткозамкнутые двигатели); более сложная технология их изготовления из-за наличия коллектора; несколько меньшая надежность из-за применения в основной рабочей цепи скользящих щеточных контактов, имеющих склонность к искрению; сравнительно быстрый износ скользящих щеточных контактов, требующих специального наблюдения в процессе эксплуатации машины. Недостатки щеточно-коллекторного узла устранены в бесколлекторном ДПТ обращенной конструкции с электронной коммутацией обмоток якоря, размещаемой на статоре и индуктором на роторе. Эти двигатели так же называют вентильными.

3.2. Устройство и работа электрической машины постоянного тока

На рис. 3.1 приведено устройство машины постоянного тока (МПТ), а на рис. 3.2 схематичное изображение в поперечном направлении. На рис.3.1 и 3.2 обозначено: 1 – вал; 2 – передний подшипниковый щит; 3 - коллектор; 4 –щёточный аппарат; 5 – сердечник якоря; 6 – главный полюс; 7 – обмотка возбуждения; 8 – корпус; 9 – задний подшипниковый щит; 10 – вентилятор; 11 – лапы; 12 – подшипники; 13 – полюсные наконечники главных полюсов; 14 - обмотка якоря; 15 - дополнительные полюсы; 16 - обмотка дополнительных полюсов; Φ – основной магнитный поток; n – частота вращения вала. Вращающаяся часть машины состоит из укрепленных на валу 1 цилиндрического якоря 5 и коллектора 3. Якорь состоит из сердечника, набранного из листов электротехнической стали, и обмотки, укрепленной на сердечнике якоря. Вид якоря с коллектором на валу приведен на рис. 3.3. Обмотка якоря состоит из нескольких катушек, начала и концы которых соединены с изолированными от вала медными пластинами коллектора 3. На коллектор наложены две неподвижные графитовые щетки 4, с помощью которых обмотка якоря соединяется с внешней цепью.

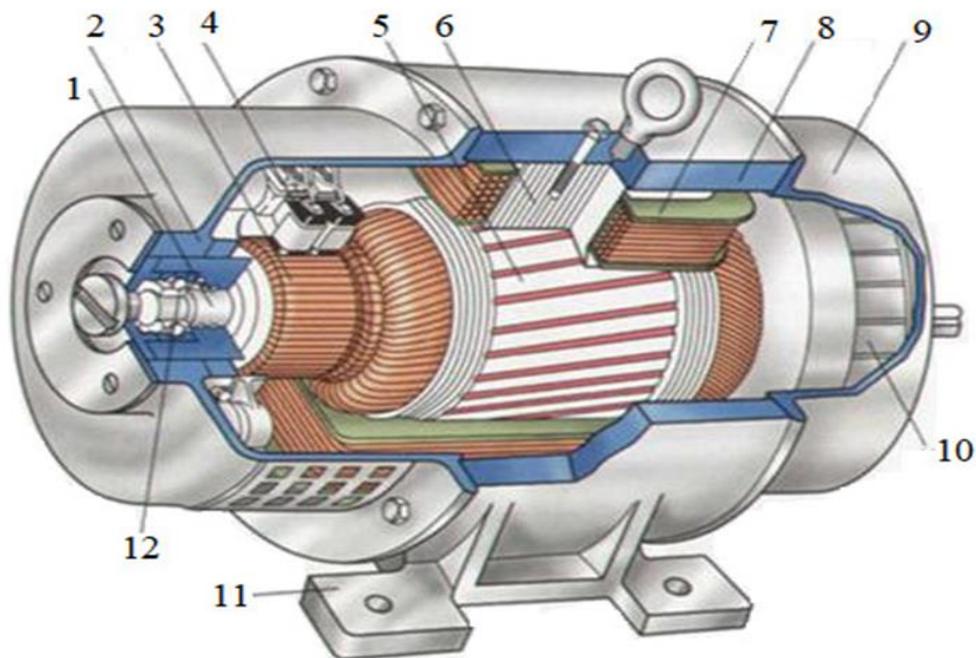


Рис. 3.1. Устройство машины постоянного тока

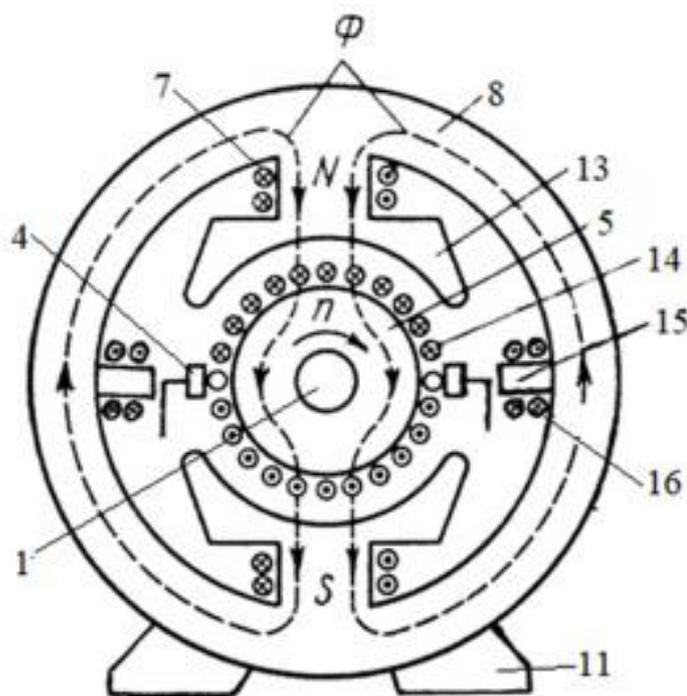


Рис. 3.2. Схематичное изображение простейшей машины постоянного тока в поперечном направлении

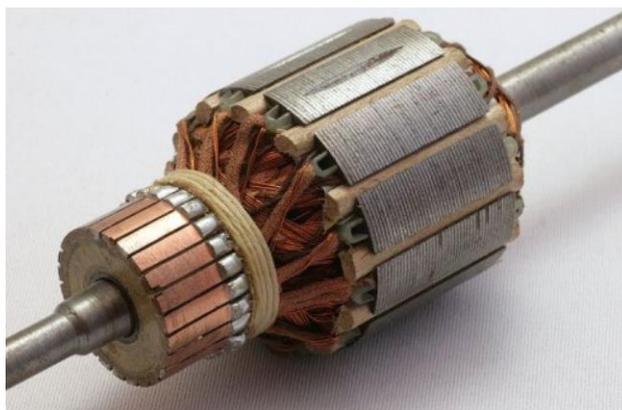


Рис.3.3. Вид якоря с коллектором на вале

Неподвижная часть машины, называемая индуктором, состоит из главных полюсов 6, обмотки возбуждения 7 и ярма 8, служащих для создания основного магнитного потока в машине. Вид индуктора машины постоянного тока представлен на рис. 3.4

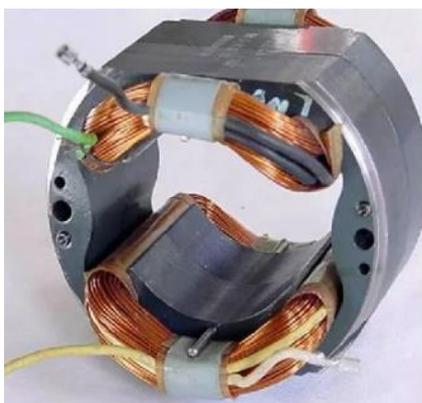


Рис. 3.4. Вид индуктора машины постоянного тока

Основной магнитный поток в типовых машинах постоянного тока создается обмоткой возбуждения, которая расположена на сердечниках полюсов и питается постоянным током. Магнитный поток проходит от северного полюса N через якорь к южному полюсу S и от него через ярмо снова к северному полюсу. Сердечники полюсов индуктора также, как и сердечник якоря изготавливаются из листовых ферромагнитных материалов для исключения вихревых токов. Передний 2 и задний 10 подшипниковые щиты служат для установки подшипников качения 12, являющихся опорами вала 1. Лапы 11 служат для крепления машины при её монтаже в установку. Дополнительные полюсы 15 с обмотками 16 служат для компенсации реакции якоря (раздел 3.4). Основной магнитный поток может создаваться постоянными магнитами, размещаемыми на ярме.

Простейший генератор постоянного тока имеет следующие компоненты: два неподвижных полюса N и S (рис. 3.5), один виток якорной обмотки, концы которого подсоединены к двум пластинам коллектора, которые изолированы друг от друга и от вала. На пластины наложены неподвижные щетки, к которым подсоединяется нагрузка. При вращении витка в пространстве между двумя полюсами с частотой n в витке индуцируется переменная ЭДС. При $n = \text{const}$ изменение ЭДС во времени повторяет распределение магнитного поля под полюсом, то есть в пространстве. При наличии нагрузки в витке протекает переменный ток.

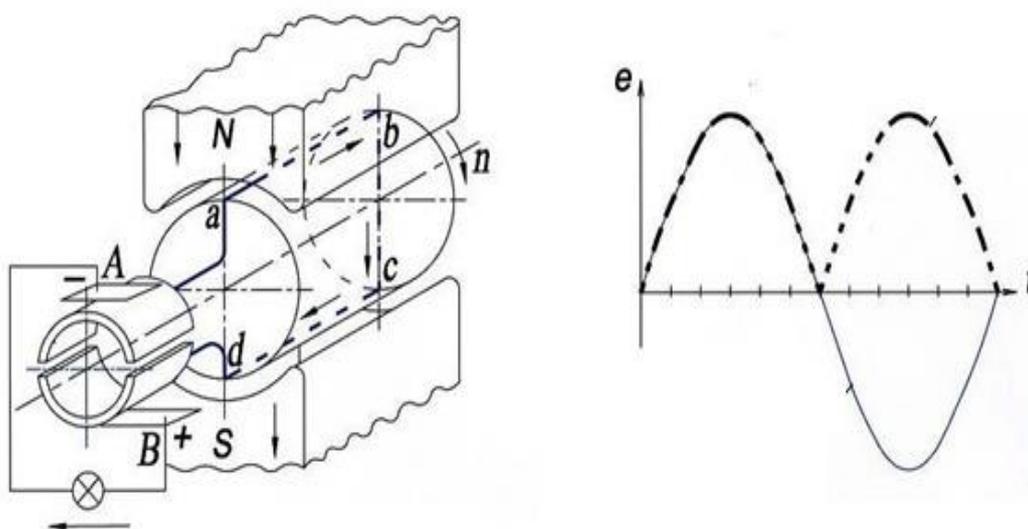


Рис. 3.5. Принцип действия простейшего генератора постоянного тока

Коллектор является механическим выпрямителем переменных ЭДС и тока обмотки якоря выпрямителем протекающего в нагрузке (пунктирная кривая на рис. 3.5). В простейшем случае коллектор состоит из двух коллекторных пластин, которые изолированы друг от друга и от вала. Для сглаживания пульсаций необходимо разместить на якоре несколько витков, равномерно распределенных по окружности и соответственно увеличить число коллекторных пластин. Тогда кривая ЭДС генератора примет вид, представленный на рис. 3.6. Для дальнейшего сглаживания кривой ЭДС и тока нагрузки генератора следует применить индуктивно-ёмкостной фильтр.

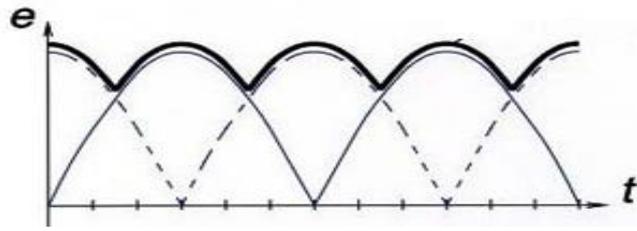


Рис. 3.6. Вид кривой ЭДС

То же устройство может работать в режиме электрического двигателя, если к щеткам подвести постоянное напряжение U (рис.3.7).

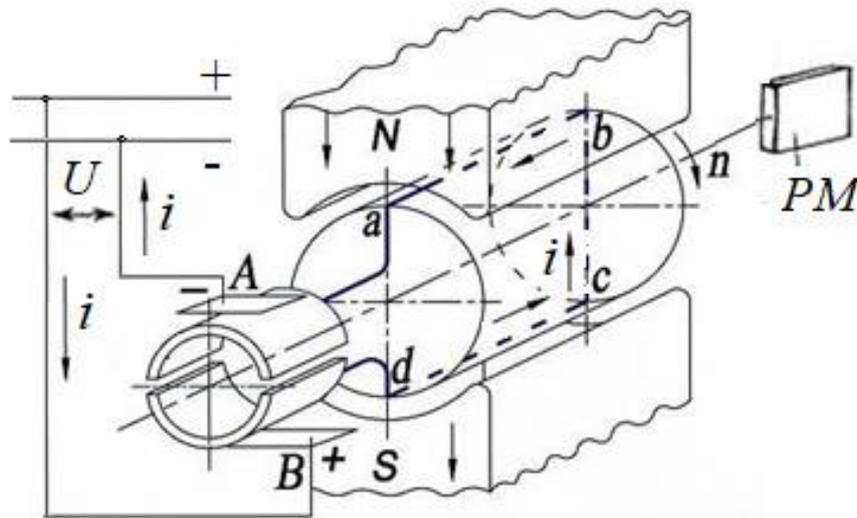


Рис. 3.7. Работа машины постоянного тока в режиме двигателя

В замкнутом через коллектор и щетки контуре потечет ток i при взаимодействии которого с магнитным потоком полюсов (закон Ампера) в витке возникнет пара электромагнитных сил, направление которых определяется по правилу левой руки: на верхний проводник сила действует вправо, на нижний – влево. При переходе верхнего проводника в зону южного полюса, а нижнего – в зону северного полюса концы проводников и соединенные с ними коллекторные пластины вступают в контакт со щетками другой полярности. Направление тока в проводниках витка изменяется на противоположное, а направление сил, момента и тока во внешней цепи не изменяется. Виток непрерывно будет вращаться в магнитном поле с частотой n и может приводить во вращение вал рабочего механизма (PM).

3.3. Магнитная и электрические цепи машин постоянного тока

Магнитная цепь главных полюсов машины постоянного тока состоит (рис. 3.8) из главных полюсов 1, воздушного зазора между полюсами и якорем 2, сердечника якоря 3 и корпуса машины или ярма 4. Магнитный поток электрических машин постоянного тока протекает по различным элементам конструкции, которые в совокупности образуют магнитную цепь. Магнитная цепь машины предназначена для создания и распределения магнитного поля в воздушном зазоре. В зависимости от числа главных полюсов магнитная система может быть двух-, четырех-, шести полюсной и т.д. Пути магнитного потока для четырехполюсной машины показаны на рис. 3.8, а. Распределение магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре характеризуется кривой $B(\alpha)$ (рис. 3.8, б), где α — дуга окружности якоря (на рис. 3.8, б магнитная система развернута в плоскость). Почти постоянное значение индукции B в воздушном зазоре необходимо для получения примерно постоянной ЭДС в проводниках, находящихся под полюсом, и оно обеспечивается специальной формой полюсных наконечников. Линии симметрии m и n , делящие пространство между полюсами пополам, называются геометрическими нейтральными линиями, а линии, проходящие через точки, где $B = 0$, — физическими нейтральными линиями (в данном случае геометрическая и физическая нейтральные линии совпадают).

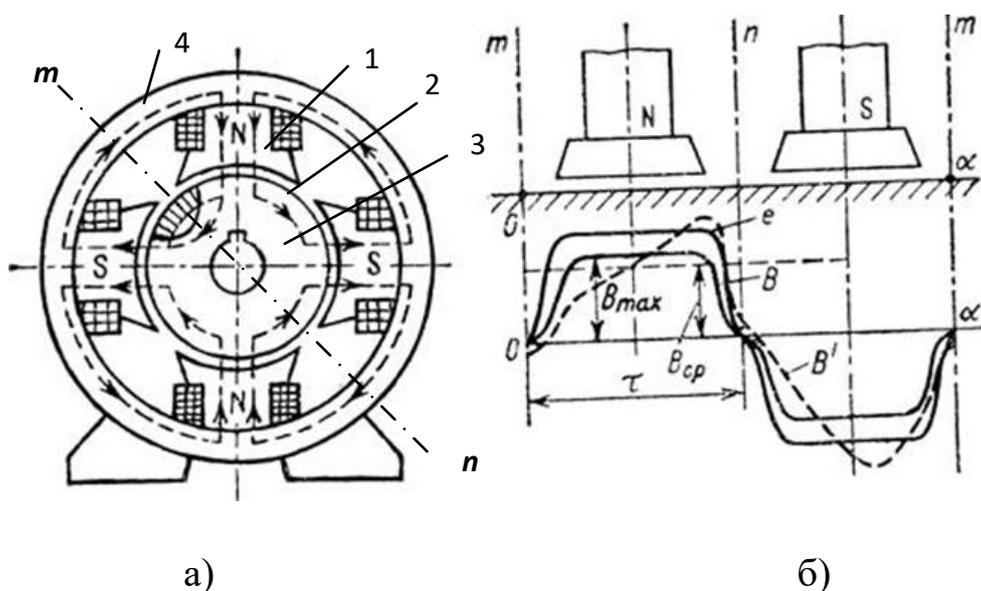


Рис. 3.8. Магнитная цепь главных полюсов машины постоянного тока

Дуга между соседними нейтральными линиями называется полюсным делением. Она обозначается буквой τ и может выражаться в метрах, градусах, радианах, числе пазов и в других удобных для расчета единицах.

Добавочные полюса применяют для создания магнитного потока в зоне коммутации. Под влиянием этого потока в коммутирующих витках наводится ЭДС, направленная против реактивной ЭДС. Включение обмоток добавочных полюсов последовательно с обмоткой якоря способствует автоматической компенсации реактивной ЭДС при изменении режимов работы двигателя. Число добавочных полюсов всегда равно числу главных. В тяговом режиме полярность добавочных полюсов должна быть обратна полярности соседних (по направлению вращения якоря) главных полюсов, а в генераторном — той же самой. Чтобы магнитный поток возрастал пропорционально току якоря, необходимо иметь слабое насыщение добавочных полюсов. Добавочный полюс состоит из сердечника и катушки. Добавочные полюсы устанавливаются на геометрической нейтральной линии между главными полюсами и крепятся болтами к ярму статора. Их обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и намотана так, что создаваемое ею магнитное поле равно по величине и направлено против магнитного поля якоря. Добавочные полюса применяют для создания магнитного потока в зоне коммутации. Под влиянием этого потока в коммутирующих витках наводится ЭДС, направленная против реактивной ЭДС. Включение обмоток добавочных полюсов последовательно с обмоткой якоря способствует автоматической компенсации реактивной ЭДС при изменении режимов работы двигателя. Число добавочных полюсов всегда равно числу главных. В тяговом режиме полярность добавочных полюсов должна быть обратна полярности соседних (по направлению вращения якоря) главных полюсов, а в генераторном — той же самой. Чтобы магнитный поток возрастал пропорционально току якоря, необходимо иметь слабое насыщение добавочных полюсов. Добавочный полюс состоит из сердечника и катушки. Добавочные полюсы устанавливаются на геометрической нейтральной линии между главными полюсами и крепятся болтами к ярму статора. Их обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и намотана так, что создаваемое ею магнитное поле равно по величине и направлено против магнитного поля якоря.

Сердечники полюсов набираются из листов, выштампованных из электротехнической стали толщиной 0,5—1 мм, а иногда также из листов конструкционной стали — толщиной до 2 мм. Так как магнитный поток полюсов в стационарных режимах не изменяется, то листы друг от друга обычно не изолируются. Сердечник полюса стягивается шпильками, концы которых расклепываются. Нижняя, уширенная, часть сердечника называется полюсным наконечником или башмаком. Расположенная на полюсе обмотка часто разбивается на 2—4 катушки для лучшего ее охлаждения. Число главных полюсов всегда четное, причем северные и южные полюсы чередуются, что достигается соответствующим соединением катушек возбуждения отдельных полюсов. Катушки всех полюсов соединяются обычно последовательно. Мощность, затрачиваемая на возбуждение, составляет около 0,5—3% от номинальной мощности машины. Первая цифра относится к машинам мощностью в тысячи киловатт, а вторая — к машинам мощностью около 5 кВт. Для улучшения условий токоотвода с коллектора в машинах мощностью более 0,5 кВт между главными полюсами устанавливаются также дополнительные полюсы, которые меньше главных по своим размерам. Сердечники дополнительных полюсов обычно изготавливаются из конструкционной стали. Сердечник якоря набирается из штампованных дисков электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Диски насаживаются либо непосредственно на вал, либо набираются на якорную втулку, которая надевается на вал. Сердечники якоря диаметром 100 см и выше состоят из штампованных сегментов электротехнической стали. Сегменты набираются на корпус якоря, который изготавливается обычно из листового стального проката и с помощью втулки соединяется с валом.

Обмотка якоря состоит из секций. Каждая секция укладывается в пазы пакета якоря так, чтобы её стороны находились под соседними полюсами. На рис. 3.9 показана схема обмотки, где $1 \div 8$ - пазы якоря и пластины коллектора. Шаг секций обмотки по пазам равен полюсному делению. В каждом пазу уложено начало одной секции (сплошная линия) и конец другой (штриховая линия) и к каждой пластине коллектора присоединены начала и концы следующих по схеме секций обмотки. В результате образуется замкнутая в кольцо последовательная электрическая цепь, состоящая из одинаковых элементов (секций). Щётки а и б (рис. 3.10) машины расположены на геометрической нейтрали.

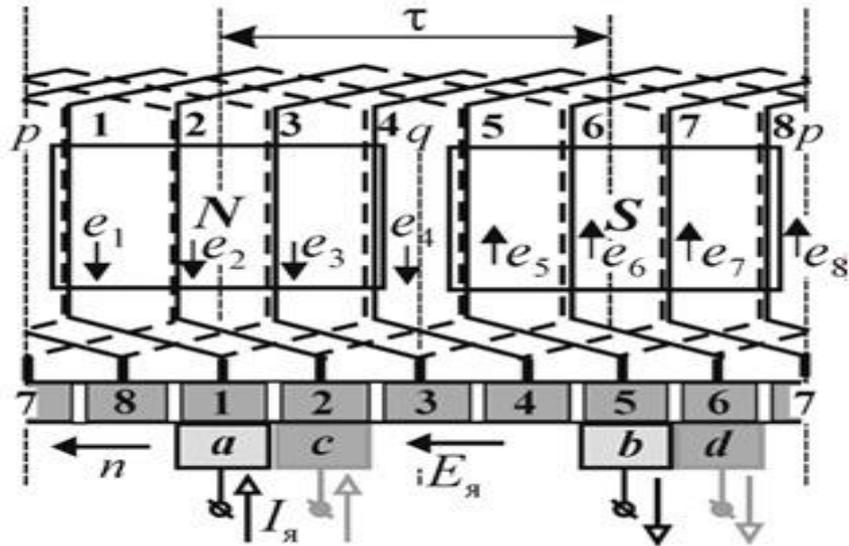


Рис. 3.9. Схема обмотки якоря

Они создают узлы соединения и делят последовательную кольцевую цепь обмотки на две параллельные ветви, по каждой из которых протекает половина тока якоря. При вращении якоря проводники секций обмотки пересекают линии магнитного поля и в них наводятся ЭДС. Начала секций 1-4 находятся под N полюсом, а секций 5-8 – под S, поэтому в этих группах секций наводятся ЭДС противоположных знаков. Но группы секций 1-4 и 5-8 находятся в разных ветвях, поэтому по отношению к щёткам или, что то же самое, по отношению к внешней цепи их ЭДС имеют одинаковое направление и в сумме одинаковые значения. В результате образуется ЭДС якоря.

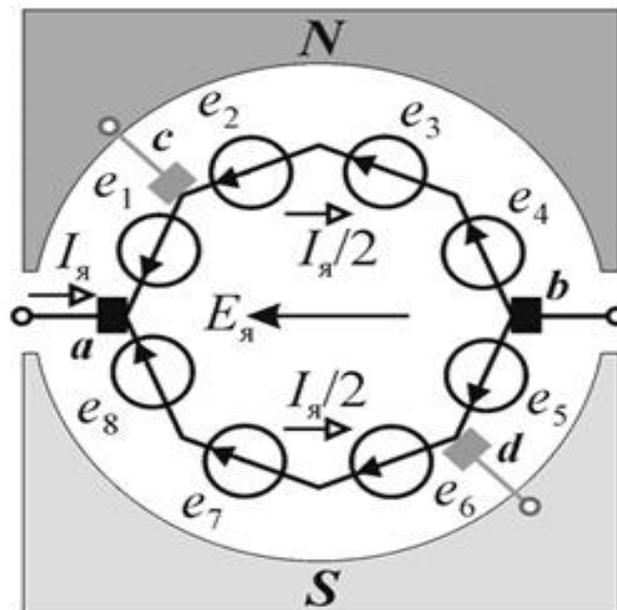


Рис. 3.10. Расположение щеток по отношению к секциям обмотки

Смещение щёток с геометрической нейтрали приводит к тому, что расположенные под разноимёнными полюсами секции оказываются в одной параллельной ветви. Например, смещение щёток из положения ab в положение cd приведёт к тому, что первая и пятая секции окажутся в ветвях с противоположным направлением ЭДС. В результате суммарная ЭДС якоря уменьшится вдвое. Для получения ЭДС параллельной ветви нужно просуммировать ЭДС $N/2a$ проводников, входящих в параллельную ветвь. ЭДС параллельной ветви. При достаточно большом числе коллекторных пластин можно пренебречь незначительной пульсацией ЭДС и определять её по выражению

$$e = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (3.1)$$

где C_e - конструктивный коэффициент, Φ - магнитный поток в зазоре, n - частота вращения вала.

Когда замкнута внешняя цепь, через обмотку якоря проходит ток. В генераторном режиме ток совпадает по направлению с ЭДС, а при работе в режиме двигателя ток и ЭДС самоиндукции (противоЭДС) имеют разное направление.

Электромагнитный момент, развиваемый машиной определяется по выражению:

$$M_{эм} = C_m \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (3.2)$$

где C_m - конструктивный коэффициент, I_a - ток якоря.

3.4. Реакция якоря машины постоянного тока

При работе машины в режиме холостого хода ток в обмотке якоря практически отсутствует, а поэтому в машине действует лишь магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения. Магнитное поле машины в этом случае симметрично относительно оси полюсов (рис. 3.11, *а*). График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представляет собой кривую, близкую к трапеции. Если же машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток, который создаст в магнитной системе машины МДС якоря. Допустим, что МДС возбуждения равна нулю и в машине действует лишь МДС якоря. Тогда магнитное поле, созданное этой МДС, будет иметь вид, представленный на рис. 3.11, *б*. Из этого рисунка видно, что МДС обмотки якоря направлена по линии щеток (в данном случае по геометрической нейтрали). Несмотря на то, что якорь вращается, пространственное положение МДС

обмотки якоря остается неизменным, так как направление этой МДС определяется положением щеток.

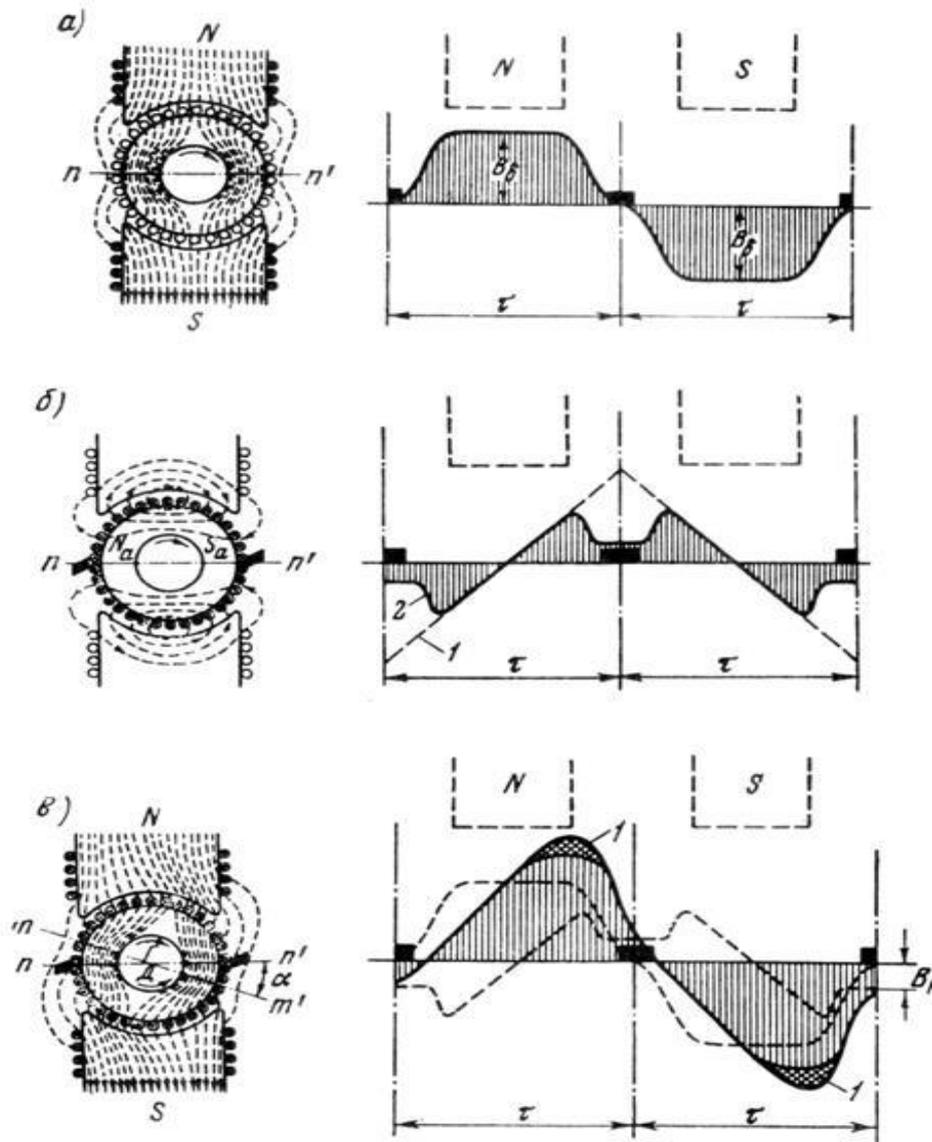


Рис. 3.11. Распределение индукции в воздушном зазоре

Наибольшее значение МДС якоря — на линии щеток (рис. 3.11, б, кривая 1), а по оси полюсов эта МДС равна нулю. Однако распределение магнитной индукции в зазоре от потока якоря совпадает с графиком МДС лишь в пределах полюсных наконечников. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко ослабляется (рис. 3.11, б, кривая 2). Объясняется это увеличением магнитного сопротивления потоку якоря в межполюсном пространстве. МДС обмотки якоря на пару полюсов пропорциональна числу проводников в обмотке N и току якоря.

Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют *реакцией якоря*. Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов. На рис. 26.4, в показано распределение магнитных силовых линий результирующего поля машины, работающей в генераторном режиме при вращении якоря по часовой стрелке. Такое же распределение магнитных линий соответствует работе машины в режиме двигателя, но при вращении якоря против часовой стрелки. Если принять, что магнитная система машины не насыщена, то реакция якоря будет лишь искажать результирующий магнитный поток, не изменяя его значения: край полюса и находящийся под ним зубцовый слой якоря, где МДС якоря совпадает по направлению с МДС возбуждения, подмагничиваются; другой край полюса и зубцовый слой якоря, где МДС направлена против МДС возбуждения, размагничиваются. При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а физическая нейтраль mm (линия, проходящая через точки на якоре, в которых индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали nn на угол α . Чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажение результирующего поля, и тем больше угол смещения физической нейтрали. При работе машины в режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а при работе двигателем - против вращения якоря.

Искажение результирующего поля машины неблагоприятно отражается на ее рабочих свойствах. Во-первых, сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы щеточного контакта и может послужить причиной усиления искрения на коллекторе. Во-вторых, искажение результирующего поля машины влечет за собой перераспределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины. Магнитная индукция в зазоре машины распределяется несимметрично относительно оси полюсов, резко увеличиваясь под подмагниченными краями полюсов. Это приводит к тому, что мгновенные значения ЭДС секций обмотки якоря в моменты попадания их пазовых сторон в зоны максимальных значений магнитной индукции (под подмагниченные края полюсных наконечников) резко повышаются. В результате возрастает напряжение между смежными коллекторными пластинами. При значительных нагрузках машины напряжение может превзойти допустимые пределы и прокладка между смежными пластинами будет перекрыта

электрической дугой. Имеющиеся на коллекторе частицы графита будут способствовать развитию электрической дуги, что приведет к возникновению мощной электрической дуги, перекрывающей весь коллектор или значительную его часть. Таковы последствия влияния реакции якоря на машину с ненасыщенной магнитной системой. Если же магнитная система машины *насыщена*, что имеет место у большинства электрических машин, то подмагничивание одного края полюсного наконечника и находящегося под ним зубцового слоя якоря происходит в меньшей степени, чем размагничивание другого края и находящегося под ним зубцового слоя якоря. Это благоприятно сказывается на распределении магнитной индукции в зазоре, которое становится более равномерным, так как максимальное значение индукции под подмагничиваемым краем полюсного наконечника уменьшается на величину, определяемую высотой участка. Однако результирующий магнитный поток машины при этом уменьшается. Таким образом, реакция якоря в машине с насыщенной магнитной системой размагничивает машину. В результате ухудшаются рабочие свойства машины: у генераторов снижается ЭДС, у двигателей уменьшается вращающий момент.

Наиболее действенным и распространенным средством уменьшения влияния реакции якоря на работу машины является применение дополнительных полюсов. Дополнительные полюсы устанавливаются на геометрической нейтральной линии между главными полюсами (см. рис. 3.2). Их обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и намотана так, что ее магнитное поле направлено против магнитного поля якоря. В зоне геометрической нейтральной линии создаются условия, благоприятные для безыскровой работы щеток (более подробно этот вопрос рассмотрен в следующем параграфе). Дополнительные полюсы выполняют свои функции во всех режимах работы машины: при изменении нагрузки одновременно изменяются ток и поле якоря, ток и поле дополнительных полюсов; при переходе машины в режим двигателя одновременно изменяется направление тока и поля якоря и направление тока и поля дополнительных полюсов. Для выравнивания индукции под полюсами в быстроходных машинах большой мощности (свыше 80 кВт на один полюс) применяют компенсационную обмотку, которую закладывают в специальные пазы в полюсных наконечниках. Компенсационная обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и обмоткой дополнительных полюсов. Магнитное поле компенсационной обмотки всегда направлено

навстречу магнитному полю якоря и таким образом оно компенсирует поле якоря в зоне главных полюсов. В машинах малой мощности вместо дополнительных полюсов применяют сдвиг щеток с геометрической нейтральной линии. При этом создаются условия, уменьшающие искрение щеток из-за влияния реакции якоря.

3.5. Коммутация ветвей обмотки машин постоянного тока

Процесс изменения тока в секциях обмотки якоря при переходе их из одной параллельной ветви в другую называют коммутацией. В более широком смысле под коммутацией понимают все явления и процессы, возникающие под щетками при работе коллекторных электрических машин. При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь контакта щетки выбирают по значению рабочего тока машины, приходящегося на одну щетку, в соответствии с допустимой плотностью тока для выбранной марки щеток. Если по какой-то причине щетка прилегает к коллектору не всей поверхностью, то возникают чрезмерные местные плотности тока, приводящие к искрению на коллекторе. Механические причины следующие: биение коллектора, его эллиптичность, шероховатость рабочей поверхности коллектора, наличие выступающих коллекторных пластин и изоляционных прокладок, вибрация щеткодержателей и т. п. Эти причины приводят к вибрации щеток, в связи с чем возможен кратковременный разрыв контакта между щеткой и коллекторными пластинами и возникновение кратковременной электрической дуги. Особенно трудно обеспечить устойчивую работу щеток при больших окружных скоростях коллектора - примерно 50 м/с и выше, что связано с особыми свойствами щеточного контакта. Электромагнитные причины приводят к тому, что даже в случае идеального состояния щеточного контакта при выходе коллекторной пластины из-под щетки происходит разрыв электрической цепи, по которой проходит ток, и возникает короткая электрическая дуга, повреждающая сбегавшие части щетки и коллекторных пластин. Искрение, вызванное электромагнитными причинами, повреждает поверхность коллектора и приводит к вибрации щеток, т. е. способствует возникновению искрения по механическим причинам. Неустойчивость щеточного контакта, обусловленная механическими причинами, существенно влияет на электромагнитные процессы, происходящие в коммутируемых секциях. Поэтому, как правило, искрение щеток на коллекторе - это результат совместного действия многих причин. Выяснение причин искрения следует

начинать с механических, так как их обнаруживают осмотром коллектора и щеточного устройства. Труднее обнаружить и устранить коммутационные причины искрения. При выпуске готовой машины с завода в ней настраивают темную коммутацию, исключаящую какое-либо искрение. Однако в процессе эксплуатации машины, по мере износа коллектора и щеток, возможно появление искрения. В некоторых случаях оно может быть значительным и опасным, тогда машину необходимо остановить для выяснения и устранения причин искрения. Однако небольшое искрение в машинах общего назначения обычно допустимо.

Качество коммутации оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегаящим краем щетки, из-под которого выходят пластины коллектора при его вращении. Степень искрения и их характеристики, согласно ГОСТ 28173-89 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 Характеристики степени искрения щеток

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
$1\frac{1}{4}$	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
$1\frac{1}{2}$	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устранимых пропиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратко-временных толчках нагрузки и перегрузках	Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых пропиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое пропиранием коллектора бензином, а так же подгар и разрушение щеток

В начальный момент коммутации (рис. 3.12, а) контактная поверхность щетки касается только пластины 1, а коммутирующая секция относится к левой параллельной ветви обмотки и ток в ней равен i_a . Затем

пластина 1 постепенно сбегает со щетки и на смену ей набегают пластины 2. В результате коммутирующая секция оказывается замкнутой щеткой и ток в ней постепенно уменьшается. В середине процесса коммутации ($t = 0,5 T_k$) контактная поверхность щетки равномерно перекрывает обе коллекторные пластины (рис. 3.12, б). В конце коммутации ($t = T_k$) щетка полностью переходит на пластину 2 и теряет контакт с пластиной 1 (рис. 3.12, в), а ток в коммутирующей секции становится равным $-i_a$, т.е. по значению таким же, что и в начале коммутации, а по направлению - противоположным. При этом коммутирующая секция оказалась в правой параллельной ветви обмотки.

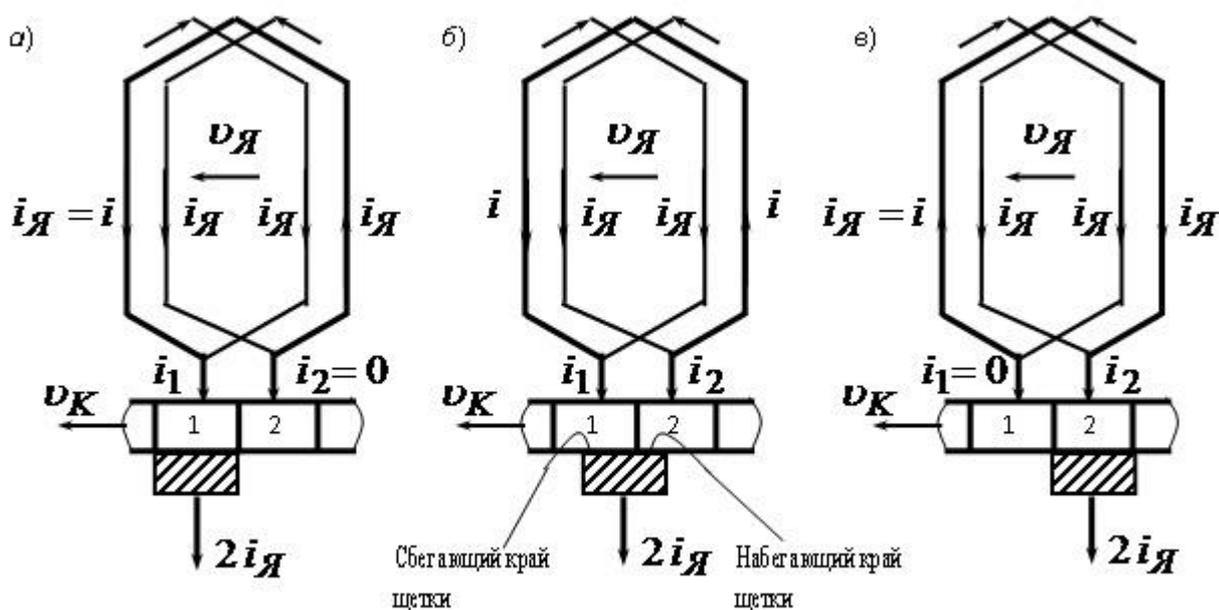


Рис. 3.12. Переход коммутирующей секции из одной параллельной ветви в другую

Основная причина неудовлетворительной коммутации в машинах постоянного тока - добавочный ток коммутации, определяемый суммой электрических сопротивлений добавочному току сопротивления мест пайки в петушках, переходного контакта между коллекторными пластинами и щеткой и собственно щетки. Однако из перечисленных сопротивлений, входящих в суммарное сопротивление наибольшее значение имеет сопротивление щетки и переходного контакта. Для уменьшения добавочного тока можно увеличить сопротивление щетки

или уменьшить суммарной ЭДС коммутирующей секции. Отсюда следует ряд способов улучшения коммутации, основные из которых рассмотрены ниже.

Выбор щеток. С точки зрения обеспечения удовлетворительной коммутации целесообразнее применять щетки с большим переходным падением напряжения в переходном контакте и собственно щетке, т.е. щетке с большим сопротивлением. Однако допустимая плотность тока в щеточном контакте этих щеток невелика, а поэтому их применение в машинах со значительным рабочим током ведет к необходимости увеличения площади щеточного контакта, что требует увеличения площади коллектора за счет его длины. Это привело бы к увеличению габаритов машины и дополнительному расходу меди. Поэтому щетки с большим сопротивлением применяют преимущественно в машинах с относительно высоким напряжением, а, следовательно, и с небольшим рабочим током. Щетки для электрических машин разделяют на четыре группы, различающиеся составом, способом изготовления и характеристиками (табл. 3.2).

Таблица 3.2 Характеристики щеток

Группа щеток, обозначение	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе, В	Номинальная плотность тока, А/мм ²	Область применения
Графитовые Г, 611М	1,9—2,0	0,11—0,12	Для машин с облегченными условиями коммутации
Электрографитированные ЭГ	2,0—2,7	0,10—0,15	Для машин со средними и затрудненными условиями коммутации и для контактных колец
Угольно-графитовые УГ; Т	2,0	0,06—0,07	Для машин со средними условиями коммутации
Медно-графитовые М, МГ	0,2—1,5	0,15—0,20	Для низковольтных (до 48 В) машин и контактных колец

Выбирают щетки в соответствии с рекомендациями, выработанными на основании многолетнего опыта проектирования и эксплуатации электрических машин. Наибольшее применение в машинах постоянного тока напряжением 110-440 В имеют электрографитированные щетки. Увеличению переходного сопротивления щеточного контакта а

следовательно улучшению коммутации, способствует политура коллектора - тонкая оксидная пленка на поверхности коллектора, обладающая повышенным электрическим сопротивлением.

Уменьшение реактивной ЭДС. Существенное влияние на суммарную ЭДС в коммутирующей секции оказывает реактивная ЭДС. ЭДС взаимоиндукции в значительной степени зависит от ширины щетки: чем шире щетка, тем большее число коллекторных пластин перекрывает она одновременно, а, следовательно, тем больше секций одновременно коммутируется, что вызывает повышение ЭДС взаимоиндукции. Однако слишком узкие щетки также нежелательны из-за недостаточной механической прочности, а также потому, что для создания необходимой площади контактной поверхности в узкой щетке пришлось бы увеличить ее длину, а это привело бы к необходимости увеличения длины коллектора. Наиболее целесообразны щетки шириной в 2-3 коллекторных деления.

Добавочные полюсы. Назначение добавочных полюсов - создать в зоне коммутации магнитное поле такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутирующей секции ЭДС компенсировала реактивную ЭДС. В машине постоянного тока без принятия мер по улучшению коммутации эти ЭДС направлены в одну сторону, т.е. действуют согласно. Суммарная ЭДС в коммутирующей секции окажется равной нулю, если посредством добавочных полюсов создать в зоне коммутации магнитное поле с магнитной индукцией такой величины и направления, чтобы ЭДС вращения изменила свое направление на обратное, а значение ее было бы равно ЭДС реактивной. Для обеспечения компенсации реактивной ЭДС при различных нагрузках машины обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря. В этом случае МДС добавочных полюсов при различных нагрузках машины изменяется пропорционально току якоря т.е. пропорционально МДС. Полярность добавочного полюса в генераторе должна быть такой же, как и у следующего по направлению вращения главного полюса, а в двигателе - как у предшествующего полюса (рис. 3.13).

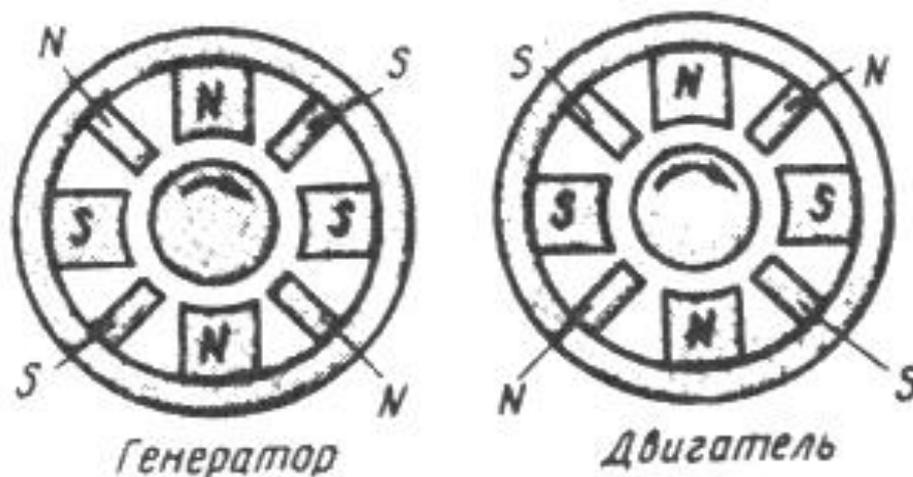


Рис. 3.13. Полярность добавочных полюсов

Получение коммутирующего поля смещением щеток. В машинах постоянного тока мощностью до 1 кВт, выполняемых без добавочных полюсов, коммутирующее поле в зоне коммутации создается смещением щеток с геометрической нейтрали. Для получения необходимого эффекта щетки следует смещать в направлении вращения якоря у генераторов или против вращения якоря у двигателей. Последний способ улучшения коммутации имеет следующие недостатки:

- а) коммутирующее поле изменяется не пропорционально нагрузке машины, что исключает полную компенсацию реактивной ЭДС во всем диапазоне нагрузок, так как для этого пришлось бы при каждом изменении нагрузки менять положение щеток (обычно щетки устанавливают в фиксированное положение, соответствующее полной компенсации реактивной ЭДС при номинальной нагрузке);
- б) при смещении щеток с геометрической нейтрали усиливается размагничивающее действие реакции якоря;
- в) для реверсируемых машин смещение щеток с геометрической нейтрали недопустимо, так как требуемое направление смещения физической нейтрали меняется с изменением направления вращения якоря.

При значительных перегрузках или внезапном коротком замыкании машины постоянного тока коммутация приобретает резко замедленный характер. В этом случае между сбегавшей коллекторной пластиной и сбегавшим краем щетки возникает электрическая дуга. Так как коллектор вращается, то дуга механически растягивается. Наряду

с этим перегрузка машины сопровождается усилением реакции якоря, под действием которой распределение индукции в воздушном зазоре машины становится неравномерным. В результате напряжение между соседними коллекторными пластинами увеличивается, превышая допустимые пределы. Это, с одной стороны, может привести к возникновению электрических дуг между смежными пластинами, а с другой стороны, появление высокого потенциала на некоторых пластинах вызывает резкое повышение напряжения между щеткой и коллекторными пластинами по мере их удаления от сбегающего края щетки. Все это создает условия для возникновения электрической дуги между щеткой и коллекторными пластинами. Таким образом, в условиях значительной перегрузки в машине постоянного тока появляются коммутационные и потенциальные причины для возникновения электрической дуги на коллекторе. При этом электрические дуги, вызванные коммутационными причинами, сливаются с дугами, вызванными потенциальными причинами, образуя вокруг коллектора мощную электрическую дугу, которая может перекинуться также и на корпус машины. Описанное явление называется круговым огнем по коллектору. Круговой огонь очень опасен, так как может привести к тяжелой аварии машины, включая возникновение в машине пожара.

Добавочные полюсы и компенсационная обмотка хотя и ослабляют опасность возникновения кругового огня, но полностью ее не устраняют. Поэтому для защиты обмотки якоря от повреждения электрической дугой в случае возникновения кругового огня в электрических машинах, работающих в условиях частых перегрузок, между коллектором и обмоткой на якоре устанавливают изолирующий экран. В некоторых машинах применяют воздушное дутье, сдувающее дугу в сторону подшипника, защищенного теплостойкой изоляционной перегородкой. Для создания препятствия на пути распространения дуги между щетками разной полярности устанавливают барьеры из изоляционного материала.

3.6. Возбуждение магнитного поля в машинах постоянного тока. Механические характеристики и режимы работы двигателей

Взаимодействие тока I в обмотке якоря с магнитным потоком Φ , создаваемым обмотками, расположенными на полюсах машины, при-

водит в соответствии с законом Ампера и возникновению электромагнитных сил, действующих на активные проводники обмотки и, следовательно, электромагнитного момента $M_{эм}$:

$$M_{эм} = C_m \Phi I, \quad (3.3)$$

где C_m - конструктивный параметр машины.

В движущихся с угловой скоростью ω в магнитном поле под действием момента $M_{эм}$ проводниках обмотки якоря в соответствии с законом Фарадея наводится ЭДС вращения e :

$$e = C_e \Phi \omega, \quad (3.4)$$

направленная в рассматриваемом случае встречно по отношению к вызвавшей движение причине - ЭДС источника питания U .

В соответствие со вторым законом Кирхгоффа для якорной цепи машины справедливо уравнение:

$$U - e = IR. \quad (3.5)$$

Зависимости $\omega(M_{эм})$ и $\omega(M_c)$, где M_c – момент сил сопротивления движению, называют механическими характеристиками соответственно двигателя и нагрузки (механизма). Зависимость $\omega(I)$ называется электромеханической характеристикой.

На рис. 3.14 приведены схемы независимого (а), последовательного (б), параллельного (в) и смешанного возбуждения основного магнитного поля, используемых в электрических машинах постоянного тока в случае применения обмотки возбуждения (ОВ). Здесь обозначено: U_B – напряжение на обмотке возбуждения; U - напряжение на обмотке якоря; R_H и R_B – сопротивления нагрузки и обмотки возбуждения соответственно. При использовании в электроприводе постоянного тока двигателя с независимым возбуждением (рис. 3.14, а) с питанием от источника напряжения $U = const$ уравнение электромеханической характеристики $\omega(I)$ получится подстановкой (3.5) в (3.4) и решением относительно ω :

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} \quad (3.6)$$

Механическую характеристику $\omega(M)$ получим, подставив в (3.6) ток, выраженный из (3.3):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}. \quad (3.7)$$

При заданных U , Φ и R уравнения (3.6) и (3.7) однозначно определяют связь между ω , I и M в любых режимах. Зависимости $\omega(M_{эм})$ и $\omega(I)$ это прямые линии (Рис. 3.15), проходящие через две характерные точки: $M=0$, $\omega=\omega_0$ и $\omega=0$, $I=I_{кз}$, $M=M_{кз}$; при $\Phi = const$ они различаются лишь масштабами по оси абсцисс. Скорость $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ (рис. 3.15) соответствует режиму идеального холостого хода: $M=0$, $E=U$ и направлены встречно.

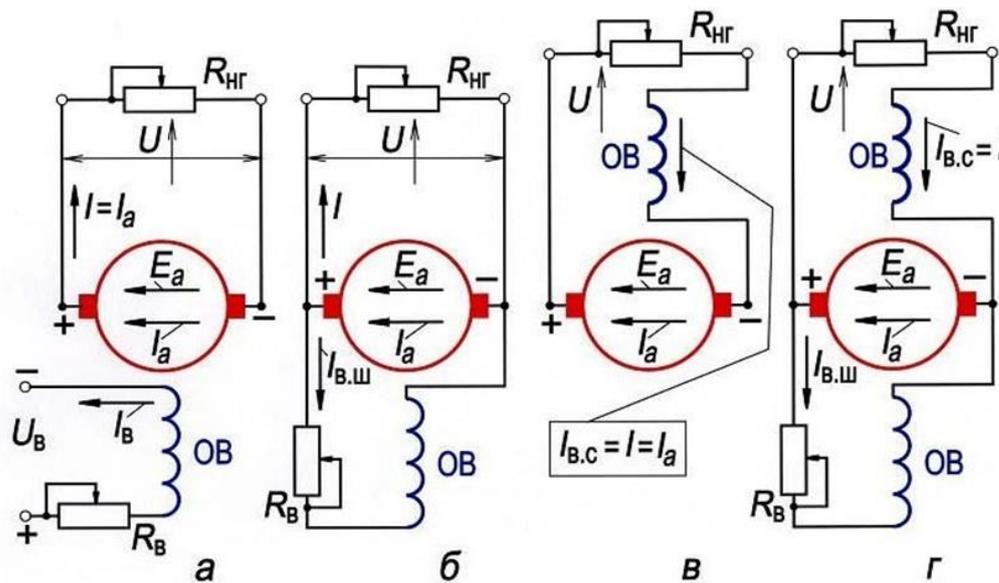


Рис. 3.14. Схемы независимого (а), последовательного (б), параллельного (в) и смешанного (г) возбуждения основного магнитного поля машин постоянного тока

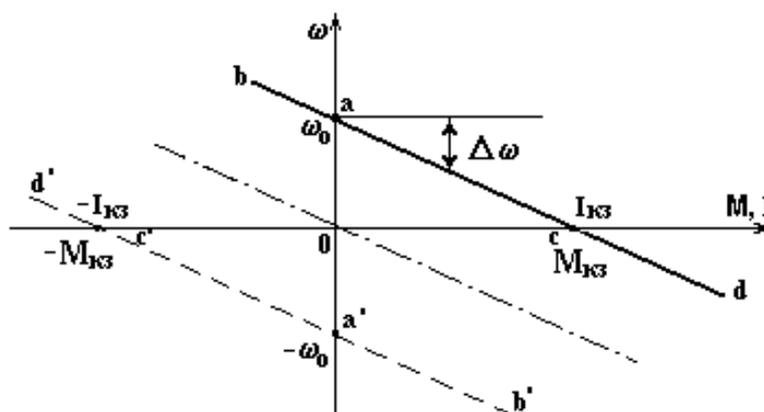


Рис. 3.15. Механические (электромеханические) характеристики электропривода постоянного тока независимого возбуждения

Величина $\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$ - перепад скорости под влиянием нагрузки.

Увеличением нагрузки при определенных условиях, которые рассматриваются ниже, можно прийти к режиму короткого замыкания: $\omega = 0$, $I = \frac{U}{R} = I_{\text{кз}}$, $M = k\Phi I_{\text{кз}} = M_{\text{кз}}$. При изменении полярности U характеристика займет положение, показанное на рис. 3.15 пунктиром.

Участки характеристики между ω_0 и $M_{\text{кз}}$, где знаки ω и M совпадают, соответствуют, как было условлено ранее, двигательному режиму работы; участки с разными знаками ω и M - тормозным режимам.

Тормозные режимы - это генераторные режимы, поскольку механическая энергия, поступившая с вала машины, преобразуется в электрическую и передается через электрические зажимы машины. В зависимости от того, куда поступает электрическая энергия, различают три тормозных режима.

а) Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) или генераторный режим работы параллельно с сетью

Если якорь двигателя вращать от некоторого постороннего источника со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода, то ЭДС двигателя будет больше приложенного напряжения, в результате чего ток в якоре двигателя и момент изменят свой знак. Механическая энергия, поступающая при этом на вал двигателя, преобразуется в электрическую и за вычетом потерь в двигателе рекуперирована в сеть. На механических характеристиках торможению с отдачей энергии в сеть соответствуют участки ab и $a'b'$ (рис. 3.15).

б) Торможение противовключением или генераторный режим работы последовательно с сетью

В режиме противовключения изменяет знак скорость двигателя при сохранении знака момента или знак момента двигателя при сохранении знака скорости. Первый случай имеет место при воздействии активного момента статической нагрузки, превышающего момент короткого замыкания на данной характеристике. В результате изменения знака скорости ЭДС двигателя будет совпадать с приложенным напряжением, и ток в якоре определится выражением:

$$I = \frac{U + E}{R}. \quad (3.8)$$

Второй случай используется для остановки двигателя путем изменения полярности напряжения, подводимого к его якорю. Вследствие механической инерции скорость двигателя и ЭДС в начальный момент сохраняются неизменными, а ток будет равен:

$$I = \frac{-U - E}{R}. \quad (3.9)$$

На механических характеристиках (рис. 3.15) торможению противовключением соответствуют участки cd и $c'd'$. В режиме торможения противовключением энергии поступает в привод и со стороны механизма, и от сети и рассеивается в сопротивлениях якорной цепи; в предыдущем случае энергия, поступающая от механизма, передавалась в сеть.

в) *Динамическое торможение или генераторный режим работы независимо от сети*

Если якорная цепь отключена от источника питания и замкнута на внешний резистор, то при вращении двигателя от внешнего источника или по инерции в якорной цепи индуцируется ЭДС и протекает ток $I = -\frac{E}{R}$, создающий момент. Характеристики проходят через начало координат - штрих-пунктир на рис. 3.15.

Для двигателя последовательного возбуждения (Рис.3.14, б), справедливы уравнения (3.6) и (3.7), однако, если для двигателя независимого возбуждения поток не зависит от тока нагрузки, то для двигателя последовательного возбуждения поток является функцией тока нагрузки.

В первом приближении зависимость между скоростью двигателя и развиваемым им моментом в установившемся режиме можно найти в предположении, что поток возбуждения и ток в якоре двигателя связаны между собой линейной зависимостью: $\Phi = \alpha I$.

Тогда $\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha}$, а поскольку $M = k\Phi I = k\alpha I^2$, то $\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}$

Таким образом, при сделанном допущении механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения изображается ги-

перболой (рис. 3.16); одной из ее асимптот является ось ординат, а другой - прямая, параллельная оси абсцисс. Жесткость механической характеристики $\beta = \frac{dM}{d\omega}$ двигателя последовательного возбуждения переменна и возрастает с увеличением нагрузки. Электропривод с двигателями последовательного возбуждения в нормальной схеме ($U=const$) может работать в тех же энергетических режимах, что и привод с двигателями независимого возбуждения, за исключением режима идеального холостого хода и генераторного режима параллельно с сетью (рекуперативное торможение), поскольку при нагрузке, стремящейся к нулю, к нулю стремится и магнитный поток, ось ω - асимптота механической характеристики. Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока при параллельном возбуждении (Рис.3.14, в) представляет собой прямую линию с отрицательным наклоном, описываемую выражением (3.7). В режиме идеального холостого хода ток в цепи якоря I , а следовательно, и момент $M=0$, поэтому частота вращения в режиме идеального холостого хода определяется выражением:

$$n_0 = U / (c_e \Phi). \quad (3.10)$$

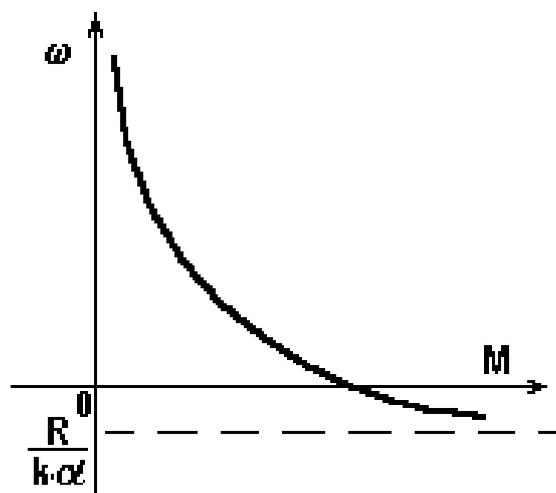


Рис. 3.16. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

Таким образом, уравнения скоростной и механической характеристик можно привести к виду

$$n = n_0 - \Delta n, \quad (3.11)$$

где Δn - изменение частоты вращения, вызванное нагрузкой двигателя. Зависимость Δn от тока нагрузки определяется выражением

$$\Delta n = -(I_a R / (c_e \Phi)), \quad (3.12)$$

а зависимость Δn от момента нагрузки имеет вид

$$\Delta n = -(MR / (c_e c_m \Phi^2)). \quad (3.13)$$

Таким образом, как это следует из (3.13), скоростная и механическая характеристики электродвигателя параллельного возбуждения представляют собой прямые линии (рис. 3.17). Выражения (3.12) и (3.13) показывают, что изменение частоты вращения электродвигателя, обусловленное изменением его нагрузки, прямо пропорционально электрическому сопротивлению цепи якоря $R = \Sigma r + r_{доб}$. Поэтому, наименьшему сопротивлению цепи якоря $R = \Sigma r$ соответствует наименьшее изменение частоты вращения Δn . В этом случае скоростная и механическая характеристики электродвигателя являются наиболее жесткими. Такие характеристики называют естественными (прямая 1).

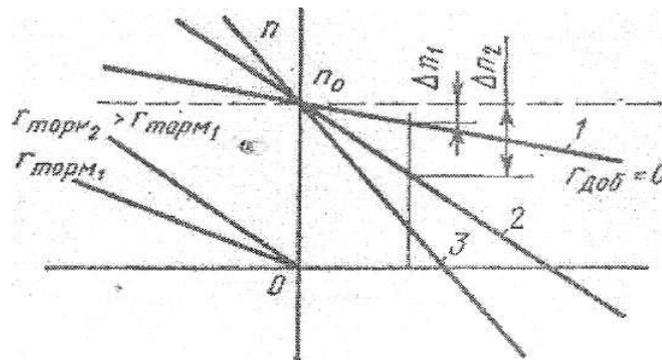


Рис. 3.17. Характеристики электродвигателя постоянного тока при параллельном возбуждении

Если же в цепь якоря ввести добавочное сопротивление, то влияние нагрузки на величину Δn становится более значительным и характеристики электродвигателя становятся мягкими и их угол наклона к оси абсцисс увеличивается (кривые 2 и 3). Такие характеристики называют искусственными (реостатными). Все характеристики электродвигателя независимо от величины сопротивления цепи якоря пересекаются в точке идеального х. х. (пограничной частоты вращения) n_0 . Объясняется это тем, что при идеальном х. х. ток якоря I_a и момент M равны нулю, а поэтому изменение частоты вращения $\Delta n = 0$.

Как отмечалось, скоростные и механические характеристики электродвигателя постоянного тока n_0 параллельного и независимого возбуждения прямолинейны. В связи с этим положение любой из этих

характеристик определяется двумя точками. Одной из них является точка идеального х. х. с координатами n_0 и $I_a = 0$ или $M = 0$, а другой — точка номинальной нагрузки в двигательном (основном) режиме с координатами $n_{ном}$ и $I_{ном}$ или $M_{ном}$. Если в цепи якоря нет добавочного сопротивления ($R = \Sigma r$), то координаты точки номинальной нагрузки определяются паспортными данными электродвигателя. Если же в цепь якоря включено добавочное сопротивление ($R = \Sigma r + r_{доб}$), то при номинальном токе якоря $I_{ном}$ частота вращения (об/мин)

$$n' = n_{ном} \frac{U_{ном} - I_{аном} (\Sigma r + r_{доб})}{U_{ном} - I_{аном} \Sigma r}. \quad (3.14)$$

Механическая характеристика двигателя при смешанном возбуждении нечто среднее между характеристиками при последовательном и параллельном возбуждении двигателя, а при возбуждении от постоянных магнитов аналогична характеристике при независимом возбуждении.

3.7. Регулирование координат двигателя постоянного тока

Для регулирования скорости и (или) момента двигателя применяются различные способы: реостатное регулирование, регулирование изменением магнитного потока, регулирование скорости изменением напряжения на якоре. **Реостатное регулирование** - самый простой и самый неблагоприятный способ регулирования скорости и (или) момента. В якорную цепь последовательно, если питание осуществляется от источника напряжения (рис. 3.18, а), включаются дополнительные резисторы.

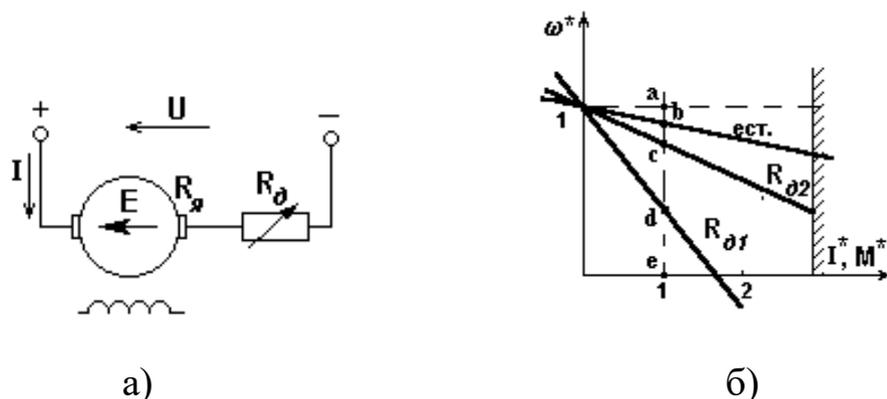


Рис. 3.18. Схема (а) и характеристики (б) при реостатном регулировании двигателя независимого возбуждения

В соответствии с (3.13) скорость идеального холостого хода при U_n и Φ_n и включении R_∂ не изменится: $\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi_n}$, а наклон характеристик будет увеличиваться пропорционально $R = R_\partial + R_\partial$. Воспользовавшись (3.13), получим при $I^* = M^* = 1$, а $\Delta\omega^* = R^*$,

$$(3.15)$$

где $\Delta\omega^* = 1 - \omega^*$, $R^* = \frac{R}{R_n} = \frac{RI_n}{U_n}$.

Соотношение (3.15) позволяет легко решать прямую задачу - построить характеристики, если задано R , и обратную - найти R и R_∂ для заданной характеристики, так как

$$R_\partial = R_n \frac{ab}{ae}, \quad R_{\partial 1} = R_n \frac{bc}{ae}, \quad R_{\partial 2} = R_n \frac{cd}{ae}, \quad R = R_\partial + R_{\partial 1} + R_{\partial 2} = R_n \frac{ad}{ae}.$$

В электроприводе с двигателем последовательного возбуждения при $U=U_n$ (рис. 3.19, а) и известной естественной характеристике $\omega_e = \frac{U_n - I(R_\partial + R_\partial)}{k\Phi}$ можно использовать уравнение искусственных

характеристик при реостатном регулировании: $\omega_u = \frac{U_n - I(R_\partial + R_\partial + R_\partial)}{k\Phi}$ и получить соотношение для расчета ω_u для

любого тока: $\omega_u = \omega_e \frac{U_n - I(R_\partial + R_\partial + R_\partial)}{U_n - I(R_\partial + R_\partial)}$. (3.16)

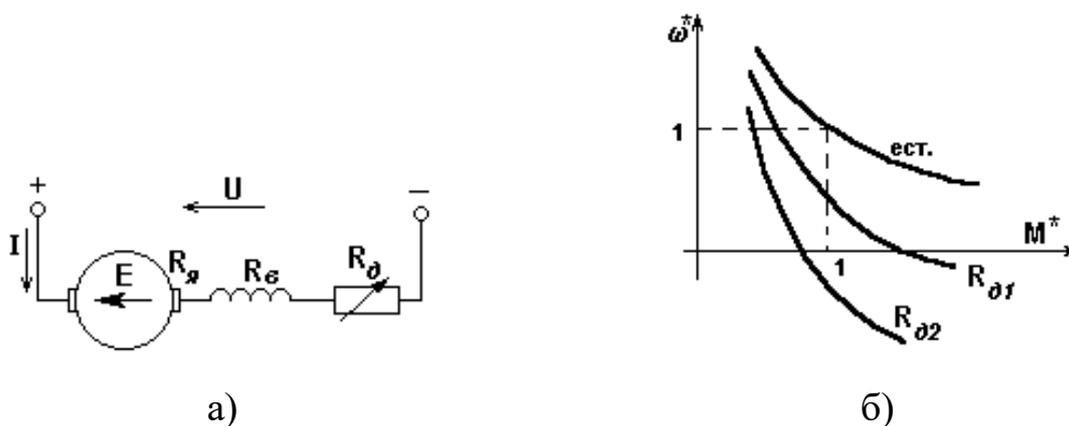


Рис. 3.19. Схема (а) и характеристики (б) при реостатном регулировании двигателя последовательного возбуждения

Регулирование координат изменением магнитного потока.

Схема включения двигателя для регулирования скорости изменением магнитного потока приведены на рис. 3.20. Будем полагать, что якорная цепь двигателя без каких-либо добавочных резисторов подключена к источнику с напряжением $U = U_n$, а цепь возбуждения питается от усилителя - возбудителя B (рис. 3.21) или в простейшем случае от того же источника через добавочный резистор. Нормальные электрические машины рассчитаны таким образом, что номинальному току возбуждения соответствует магнитный поток на колене кривой намагничивания. Типичная усредненная кривая намагничивания для ряда машин показана на рис. 3.22. Так как $I_{вн}$ соответствует допустимому нагреву обмоток возбуждения, то при регулировании скорости в условиях продолжительной работы ток возбуждения можно только уменьшать.

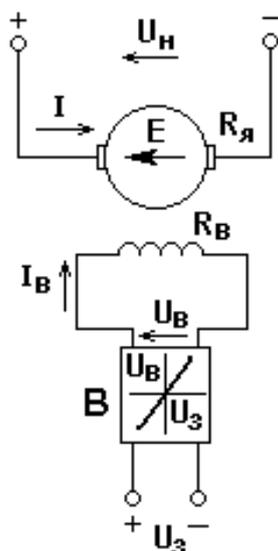


Рис. 3.20. Схема электропривода с регулированием скорости изменением магнитного потока

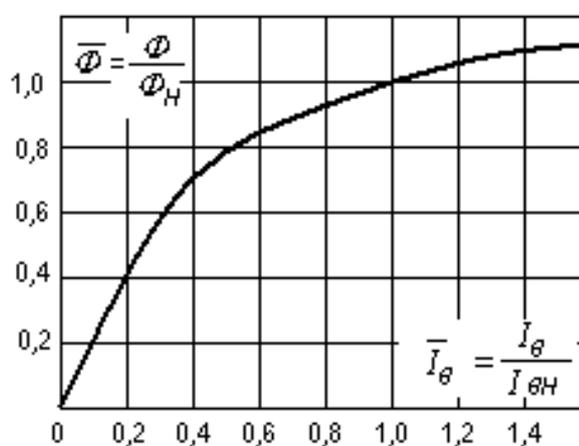
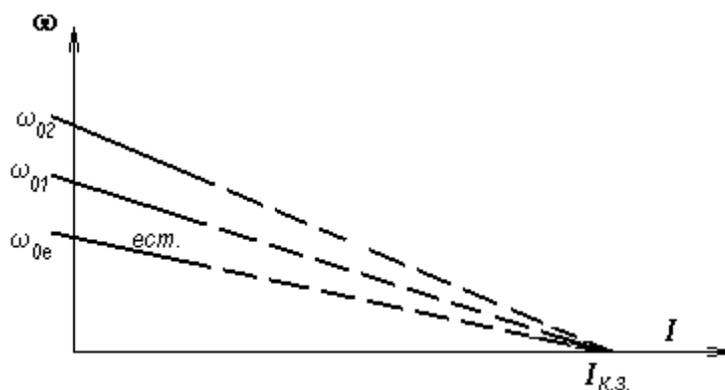


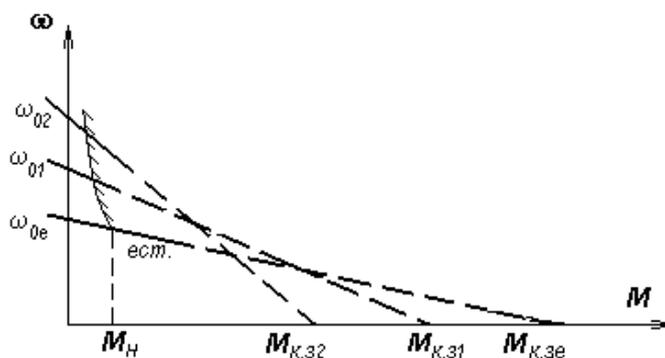
Рис. 3.21. Типичная кривая намагничивания машины постоянного тока

Электромеханические и механические характеристики двигателя при ослаблении поля показаны на рис. 3.22 (нерабочие участки изображены пунктирными линиями). Скорость идеального холостого хода $\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi}$ растет с уменьшением потока. Так как ток короткого замыкания не зависит от степени ослабления поля, все электромеханические

характеристики пересекаются в одной точке $I_{к.з.} = \frac{U_n}{R_{я}}$ (следует помнить, что ток короткого замыкания для нормальных машин может во много раз превосходить допустимый). Момент короткого замыкания $M_{к.з.} = kI_{к.з.}\Phi$ уменьшается с уменьшением потока (рис. 3.22, б).



а)



б)

Рис. 3.22. Характеристики двигателя постоянного тока при ослаблении поля

При питании якорной цепи от источника тока изменение магнитного потока позволяет регулировать момент от $-M_n$ до $+M_n$ при вертикальных.

Регулирование скорости изменением напряжения на якоре

Схема электропривода, обеспечивающая регулирование напряжения на якоре, показана на рис. 3.23, а. Этот способ регулирования предполагает использование силового управляемого преобразователя (УП), установленная мощность которого превышает мощность двигателя. При изменении U (в данном случае E_n) пропорционально изменяется

лишь ω_0 , а $\Delta\omega$ не зависит от U , т.е. семейство искусственных характеристик при $k\Phi = k\Phi_n = c$ - параллельные прямые с наклоном несколько большим чем у естественной характеристики двигателя, поскольку $R = R_{я} + R_n$ - рис. 3.24,б; предполагается, что УП имеет двустороннюю проводимость.

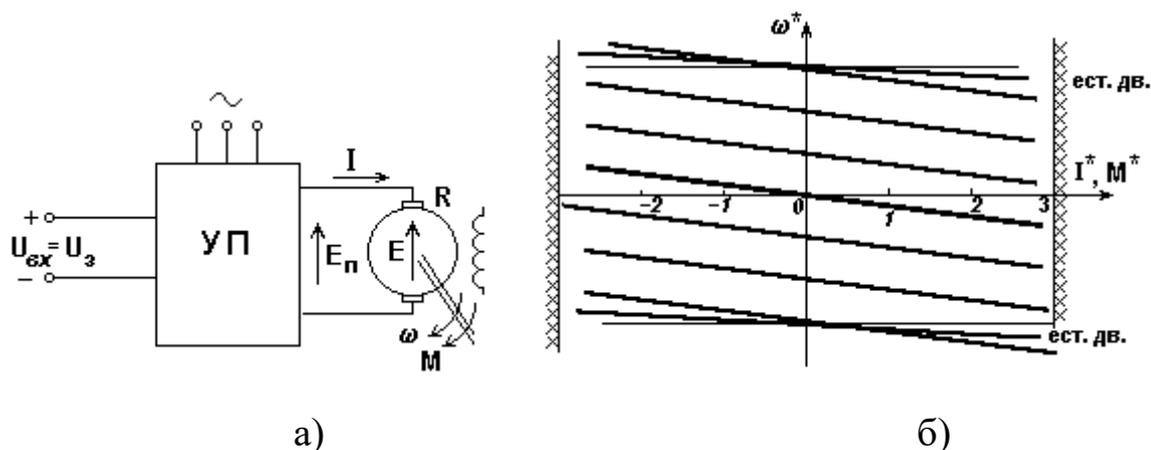


Рис. 3.23. Схема (а) и характеристики (б) при регулировании скорости двигателя постоянного тока изменением напряжения

Уравнения характеристик:

$$\omega = \frac{KU_{вх}}{c} - \frac{I(R_{я} + R_n)}{c}$$

и

$$\omega = \frac{KU_{вх}}{c} - \frac{M(R_{я} + R_n)}{c^2}, \quad (3.17)$$

где $K = \frac{E_n}{U_{вх}}$ - коэффициент передачи УП. Свойства УП оказывают влияние на вид характеристик. Так, при использовании преобразователей с односторонней проводимостью ($I > 0$) характеристики располагаются лишь в I и IV квадрантах.

Вопросы для самопроверки к главе 3:

1. Назовите достоинства и недостатки электрических машин постоянного тока.
2. Назовите основные детали и узлы машины постоянного тока.
3. Перечислите способы создания магнитного поля генератора постоянного тока.
3. Что показывает характеристика холостого хода генератора постоянного тока?

4. Назовите условия самовозбуждения генератора постоянного тока.
5. Что показывает внешняя характеристика генератора постоянного тока?
6. Что показывает регулировочная характеристика генератора постоянного тока?
7. Что такое электромагнитный вращающий момент двигателя постоянного тока?
8. Что показывает механическая характеристика двигателя постоянного тока?
9. Какой двигатель постоянного тока обладает мягкой механической характеристикой?
10. Приведите способы пуска двигателя постоянного тока и их отличия.
11. Опишите способы регулировки частоты вращения двигателя постоянного тока.
12. Расскажите о способах изменения направления вращения двигателя постоянного тока.
13. Перечислите основные части машины постоянного тока.
14. Поясните назначение главных полюсов машины постоянного тока.
15. Опишите назначение коллектора машины постоянного тока.
16. Какие виды обмоток якоря машины постоянного тока вы знаете?
17. Изложите особенности простой волновой обмотки.
18. Что представляет собой комбинированная обмотка якоря?
19. Поясните назначение щеткодержателя машины постоянного тока.
20. Чем отличается левоходовая обмотка якоря от правоходовой?
21. Что такое шаг обмотки?
22. Что такое полюсное деление?
23. В чем сущность явления реакции якоря машины постоянного тока?
24. Почему МДС якоря, действующая по поперечной оси, вызывает размагничивание машины по продольной оси?
25. Как учитывается размагничивающее действие реакции якоря при расчете числа витков полюсной катушки обмотки возбуждения?
26. С какой целью компенсационную обмотку включают последовательно с обмоткой якоря?
27. Почему с увеличением воздушного зазора ослабляется размагничивающее влияние реакции якоря?
28. Какие способы возбуждения применяют в машинах постоянного тока?
29. Какие причины могут вызвать искрение на коллекторе?

30. Какие степени искрения предусмотрены ГОСТом? Дайте каждой из них характеристику и укажите условия допустимости.
31. Почему прямолинейная коммутация не сопровождается искрением?
32. Какие причины, вызывающие искрение, возникают при замедленной коммутации?
33. Объясните назначение и устройство добавочных полюсов.
34. Каковы причины, способные вызвать круговой огонь по коллектору?

Практические задания к главе 3

Задание ПЗ.1 Изучить конструкцию, принцип действия, технологию разборки и сборки, выполнить оценку технического состояния двигателя постоянного тока с постоянными магнитами.

Введение. Существует множество электродвигателей, принципы, работы которых основаны на электромагнитном преобразовании энергии. К ним относятся двигатели с постоянными магнитами, которые благодаря высоким характеристикам получили широкое распространение в электроприводах систем автоматике. В данном разделе основное внимание уделено рассмотрению принципа действия коллекторных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Система возбуждения состоит из двух постоянных магнитов с полюсными наконечниками, выполненных из магнитомягкого материала и входящих в состав статора (рис. П 3.1).

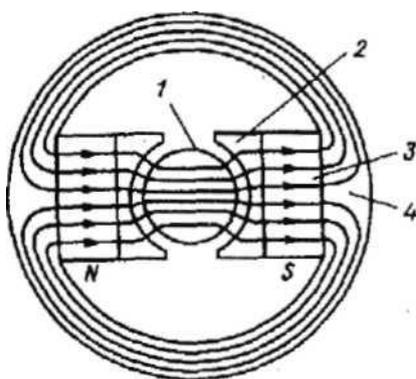


Рис. ПЗ.1. Система возбуждения; направление магнитного потока
Здесь обозначено: 1 – ротор; 2 – магнитный полюсный наконечник (из магнитомягкого материала); 3 – постоянный магнит; 4 – ярмо (концентратор магнитного потока).

Конструкция системы возбуждения двигателя тесно связана с природой используемых в нем постоянных магнитов. На рис. ПЗ.2, а показана петля гистерезиса. Предположим, что читатель имеет некоторые знания по природе ферромагнетизма- В большинстве случаев постоянный магнит используется во втором и четвертом квадрантах петли гистерезиса. В этих квадрантах направления напряженности магнитного поля H и индукции B противоположны друг другу. Кривая $B-H$, расположенная во втором квадранте, называется кривой размагничивания. В этой области магнитные характеристики называются характеристиками размагничивания. Главными точками и характеристиками размагничивания являются следующие:

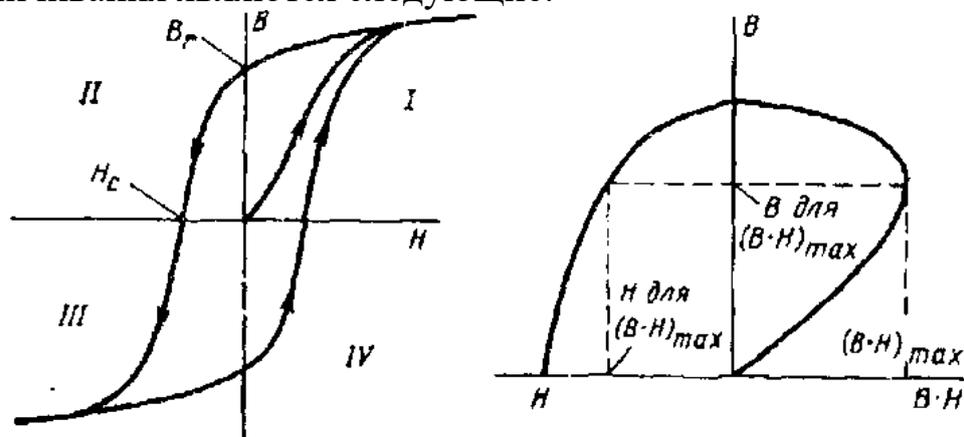


Рис. ПЗ.2. Петля гистерезиса, кривая размагничивания и магнитная энергия

1. Остаточная индукция и коэрцитивная сила (по индукции). Однажды намагниченный постоянный магнит остается намагниченным даже в том случае, если напряженность магнитного поля уменьшается до нуля. Магнитная индукция в этой точке носит название остаточной индукции и обозначается B_r . При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля в противоположном направлении магнитная индукция уменьшается по кривой размагничивания до нуля. Напряженность магнитного поля полностью размагниченного магнита называют магнитной коэрцитивной силой по индукции и обозначают H_c .

2. Магнитная энергия и максимальная магнитная энергия. Магнитная энергия это значение произведения магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H в каждой точке кривой размагничивания. Магнитная энергия в функции от B во втором квадранте показана на рис. 3.2, б. Максимальное значение магнитной энергии называется максимальной магнитной энергией и является показателем энергоемкости постоянного магнита.

Напряженность магнитного поля и коэрцитивная сила измеряются в международной системе единиц СИ в $A \times m^{-1}$, магнитная индукция и остаточная индукция – в Тл, магнитная энергия – в кДж $\times m^{-1}$

Прямая возврата. Участок петли гистерезиса, лежащий во втором квадранте, может быть аппроксимирован прямой линией, называемой линией возврата. Прямая AC на рис. ПЗ.3 является прямой возврата.

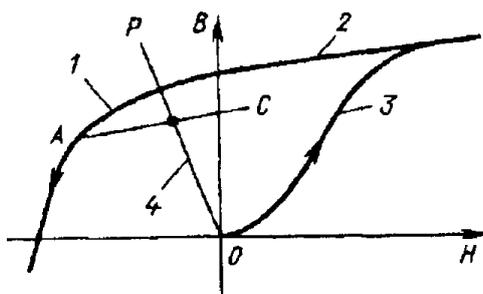


Рис. ПЗ.3. Прямая возврата

1 – кривая размагничивания; 2 – предельная петля гистерезиса; 3 – кривая первоначального намагничивания; 4 – прямая магнитной проводимости

3. Стабилизация. При работе двигателя из-за уменьшения уровня магнитного потока уменьшаются коэффициенты момента и противо-ЭДС. Это так называемое размагничивание машины. Для того, чтобы исключить размагничивание в процессе работы, необходимо стабилизировать постоянные магниты перед их использованием в машине, что достигается определенным выбором рабочей точки на прямой возврата, положение которой определяется значением магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H . Такой процесс называется стабилизацией и обычно выполняется при изготовлении деталей.

4. Рабочая точка. При отсутствии тока якоря рабочая точка постоянного магнита лежит на пересечении прямой возврата и прямой магнитной проводимости OP . Прямая магнитной проводимости определяется параметрами конструкции машины: длиной воздушного зазора, размерами магнитной системы и числом витком обмотки якоря. При работе двигателя ток якоря вызывает смещение рабочей точки. Рабочая точка одного полюса постоянного магнита перемещается в одну сторону по прямой возврата, рабочая точка другого полюса – в обратную сторону по этой же прямой. Поэтому в целом магнитный поток

постоянного магнита остается почти постоянным до тех пор, пока рабочая точка не переместится до основной кривой размагничивания предельной петли гистерезиса.

Типы постоянных магнитов.

В двигателях постоянного тока малой мощности в основном применяются три различных типа постоянных магнитов: магнит типа альнико, керамические или ферритовые магниты и редкоземельные магниты (на основе интерметаллических соединений кобальта и редкоземельных элементов).

Отметим следующие особенности постоянных магнитов.

Магнит типа альнико. Постоянный магнит такого типа создает большую индукцию, но имеет малую коэрцитивную силу. Из-за малого значения коэрцитивной силы два близкорасположенных противоположных полюса постоянного магнита ослабляют магнитное поле друг друга. Вот почему магниты на основе альнико используют с предварительным продольным намагничиванием.

Ферритовый магнит (керамический магнит). В противоположность магнитам типа альнико этот тип магнита создает малую индукцию, но имеет большую коэрцитивную силу. Поэтому, из-за большой коэрцитивной силы, возможно их поперечное намагничивание. Магниты на основе феррита получили широкое распространение вследствие их низкой стоимости как материала и удобства в изготовлении.

Редкоземельные магниты. Они имеют высокие значения как остаточной индукции, так и коэрцитивной силы. Ранее из-за высокой стоимости магниты на основе самарий-кобальта применялись лишь в серводвигателях самолетов и военном оборудовании, а также в электродвигателях периферийных устройств ЭВМ. Однако в настоящее время области применения упомянутых магнитов значительно расширяются.

Рассмотрим конструктивные особенности применения каждого типа постоянных магнитов.

1. Магниты типа альнико. Магниты этого типа применяются в высококачественных серводвигателях постоянного тока благодаря высокому значению остаточной индукции.

Примеры построения систем возбуждения показаны на рис. П 3.4.

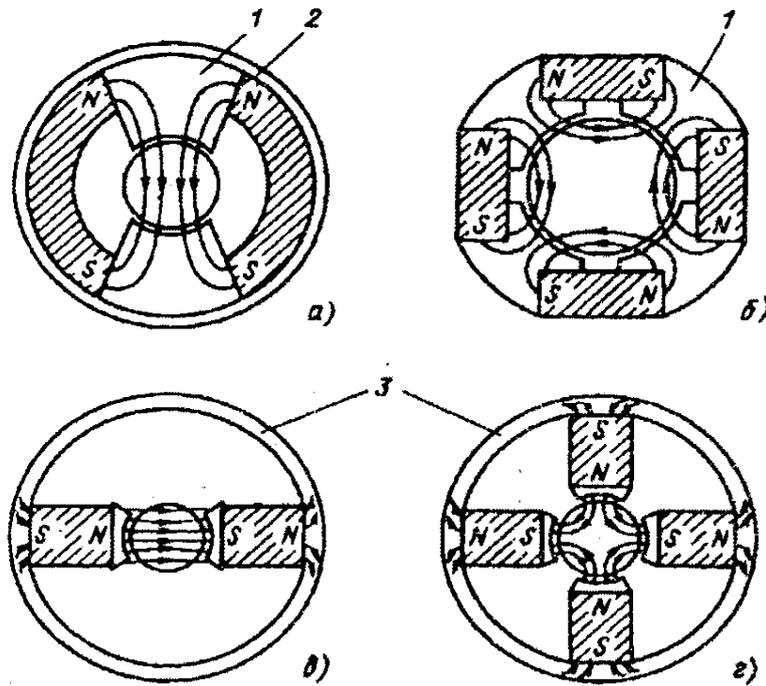


Рис. П3.4. Система возбуждения с магнитами альнико:

1 – полюс; 2 – корпус; 3 – ярмо

На рис. П3.4, а) и в) изображены двухполюсные конструкции, а на рис. П3.4, б) и г) – четырехполюсные конструкции двигателей.

Конструкция двухполюсного маломощного двигателя, система возбуждения которого выполнена на основе анизотропного альнико, показана на рис. П 3.5.

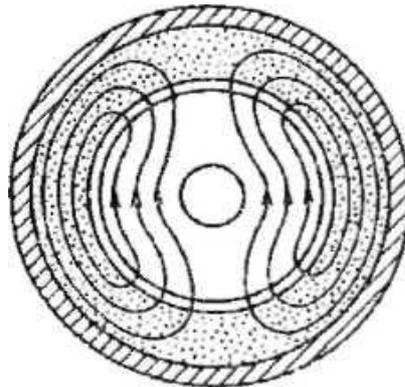


Рис. П3.5. Конструкция системы возбуждения маломощного двигателя с магнитами альнико

Для коллекторных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов количество полюсов обычно равно двум или

четырем, однако существуют и другие разновидности двигателей, использующих шестиполюсную магнитную систему и даже больше.

2. Ферритовые магниты. Магниты этого типа из-за высокого значения коэрцитивной силы не размагничиваются даже при значительном внешнем поле. Сечения конструкций системы возбуждения, использующих один или два ферритовых магнит(а), показаны на рис. П 3.6.

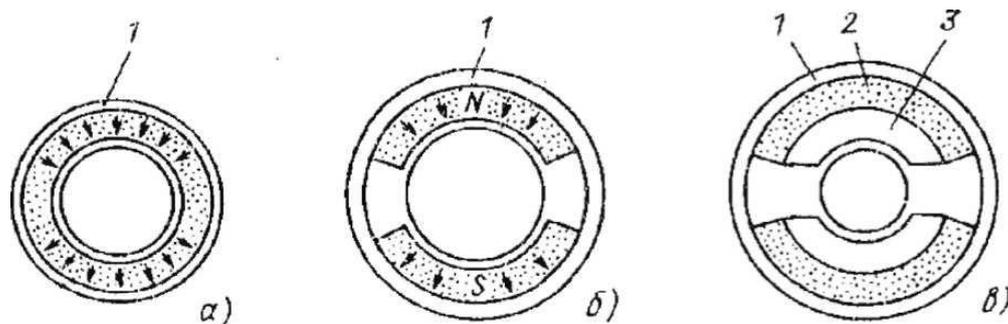


Рис. П3.6. Конструкция системы возбуждения на основе ферритовых магнитов

а – кольцевой анизотропный ферритовый магнит; б – анизотропный ферритовый магнит; в – в виде "ласточкина хвоста"; в – с полюсными башмаками в виде "ласточкина хвоста"; 1 – магнитомягкая сталь (ярмо); 2 – магнит; 3 – полюсный башмак.

На практике применяют некоторые конструктивные меры по увеличению индукции в воздушном зазоре. Так как ферритовые магниты имеют низкое значение остаточной индукции, то для увеличения индукции в воздушном зазоре делают постоянный магнит по длине больше длины ротора, как это показано на рис. П 3.7.

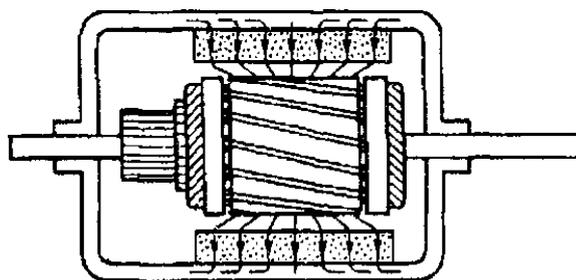


Рис. П3.7. Двигатель с увеличенной длиной магнита

При таком конструктивном решении достаточно велика площадь, занятая магнитопроводом статора (корпусом), что позволяет уменьшить его толщину и соответственно массу всего двигателя.

3. Редкоземельные магниты. Магниты этого типа, так же как и ферриты, имеет высокое значение коэрцитивной силы. Конструктивно редкоземельные постоянные магниты выполняются тонкими из-за их высокой стоимости. Редкоземельные магниты в конструкции системы возбуждения расположены идентично расположению ферритовых магнитов, как это показано на рис. П 3.8.

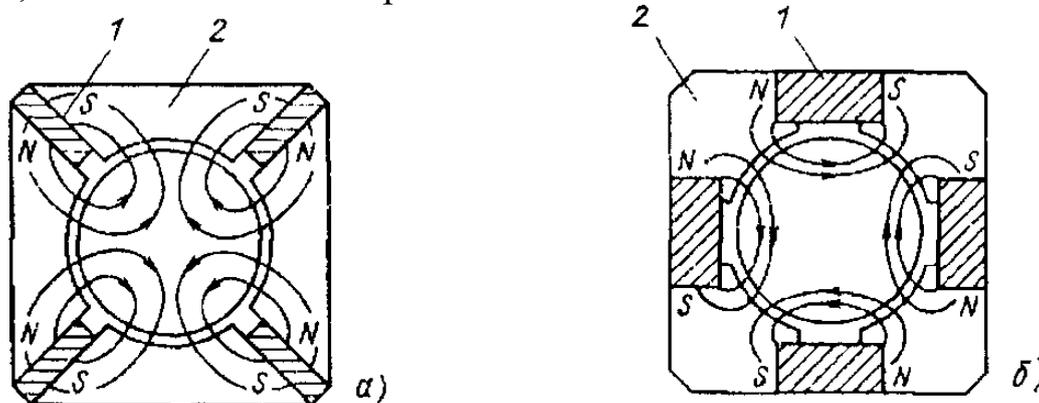


Рис. П3.8. Сравнение конструкций системы возбуждения, выполненных на редкоземельных магнитах (а) и магнитах альнико (б)
1 – магнит; 2 – полюсный башмак

Однако конструкция ротора двигателя с редкоземельными магнитами отличается от конструкции ротора двигателя с ферритовыми магнитами, поскольку самарий-кобальтовые магниты обладают высокой остаточной индукцией. У редкоземельных магнитов индукция вдвое больше по сравнению с ферритовыми магнитами при одинаковых конструктивных размерах (площади и длине).

Поэтому, казалось бы, что и момент, развиваемый двигателем с редкоземельными постоянными магнитами, должен был бы во столько же раз увеличиться. Однако у двигателей с ферритовыми постоянными магнитами имеется возможность увеличить линейную нагрузку за счет изменения соотношения ширины паза к ширине зубца.

Порядок выполнения работы

1. Внеаудиторная подготовка к работе.

1.1. Используя конспекты лекций, учебники и учебные пособия, методические указания к настоящей практической работе, а также доступный справочный материал:

- ознакомиться с назначением и принципом действия двигателя постоянного тока с постоянными магнитами;
- изучить устройство двигателей, назначение их узлов и элементов;
- ознакомиться с основными техническими характеристиками;

- ознакомиться с требованиями к техническому состоянию основных узлов и элементов;
- изучить технологию разборки двигателя.

1.2. В процессе подготовки к работе найти ответы на контрольные вопросы методических указаний.

1.3. Подготовить таблицу оценки технического состояния элементов и узлов двигателя по образцу, приведенному в настоящем руководстве.

2. Работа в аудитории.

2.1. Для ознакомления с конструкцией и элементами двигателя изучить демонстрационный стенд и плакаты.

2.2. Получить набор инструментов, необходимых для разборки и сборки двигателя.

2.3. Разобрать двигатель в следующем порядке:

2.3.1. С помощью ключа № 14 отвернуть гайку крепления фланца.

2.3.2. Отвернуть отверткой винт крепления щеткодержателя и снять щеткодержатель.

2.3.3. Снять крышку, а затем ротор в сборе, вентиля с выводами обмотки статора.

2.3.4. Извлечь статор из крышки.

2.4. Оценить техническое состояние двигателя.

2.4.1. Осмотреть состояние статора и ротора двигателя. Оценить состояние изоляции видимой части обмотки.

Осмотреть обмотку ротора и коллектор и сделать заключение о состоянии изоляции и коллекторных пластин. При наличии нагара произвести их очистку с помощью абразивной бумаги. Провод роторной обмотки не должен иметь следов перегрева.

Примечание. Все выводы и результаты оценки технического состояния элементов и узлов записать в заготовленную ранее таблицу.

С помощью омметра проверить целостность изоляции обмотки. Для этого один зажим прибора необходимо подключить к одной из коллекторных пластин, а другой к магнитопроводу. Сопротивление изоляции должно быть равным бесконечности. С помощью омметра проверить целостность роторной обмотки, для чего следует измерить сопротивление каждой катушки. Сопротивление должно быть близким к паспортному значению.

2.4.2. Визуально проследить прохождение обмоточного провода обмотки, ближайшей к внутренней поверхности магнитопровода

статора, на основании чего составить схему укладки трехфазной обмотки статора.

2.4.3. Проверить состояние подшипников. Внешние обечайки подшипников должны свободно вращаться относительно внутренних обечаек. Кроме этого, люфт одной обечайки относительно другой должен практически отсутствовать.

2.4.4. Осмотреть щеткодержатель со щетками. Длина щеток не должна быть менее 8 мм. Щетки должны свободно перемещаться в направляющих, не иметь сколов. Поверхность трений о кольца должна быть ровной. Направляющие щеткодержателя должны быть без механических повреждений и без следов подгара или оплавления. Щетки должны выступать из щеткодержателя не менее чем на 5 мм. Пружины щеткодержателя должны быть исправными. Исправность пружин можно проверить путем нажатия на щетки. При снятии усилия щетки должны вернуться под действием пружин в исходное положение.

2.4.5. Проверить состояние крышек генератора. Они не должны иметь механических повреждений.

Все результаты оценки технического состояния двигателя занести в таблицу.

Вопросы для самопроверки к практическому заданию ПЗ.1:

1. Каково назначение электрических машин постоянного тока?
2. Как устроены электрические машины постоянного тока?
3. По каким конструктивным характеристикам различают электрические машины постоянного тока?
4. Каково назначение ... (например, статора, ротора), и какую функцию этот узел выполняет?
5. Какие виды возбуждения бывают в электрических машинах постоянного тока?
6. По каким параметрам выбирают электрические машины постоянного тока для различных сфер применения?

Задание ПЗ.2 Приобрести практические навыки в исследовании уравнения движения электропривода и определении момента инерции вращающихся тел.

Введение. В механическом движении участвуют подвижная часть двигателя, передаточные устройства и исполнительный орган. Сово-

купность этих элементов называют кинематической схемой или механической частью электропривода. Движение любого элемента механической части привода подчиняются известным из курса физики законам механики:

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \text{ - поступательное движение,}$$

$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} \text{ - вращательное движение,}$$

$$M - M_c = J \times \frac{d\omega}{dt} \text{ - основное уравнение движения электропривода,}$$

где: M - момент развиваемый двигателем; M_c - момент сопротивления; J - момент инерции.

Момент инерции - величина, характеризующая распределение масс в теле и являющаяся наряду с массой мерой инертности тела при непоступательном движении. В механике различают момент инерции осевые и центробежные. Осевым моментом инерции тела относительно оси z наз. величина, определяемая равенством

$$J_z = \sum m_i h_i^2 \quad \text{или} \quad J_z = \int_V \rho h^2 dV \quad (\text{ПЗ.1})$$

где m_i - массы точек тела, h_i - их расстояния от оси z , ρ - массовая плотность, V - объём тела. Величина J_z является мерой инертности тела при его вращении вокруг оси. Осевой момент инерции можно также выразить через линейную величину r_z , называемую радиусом инерции относительно оси z .

Центробежными моментом инерции относительно системы прямоугольных осей x, y, z , проведённых в точке O , называются величины, определяемые равенствами

$$J_{xy} = \sum m_i x_i y_i, \quad J_{yz} = \sum m_i y_i z_i, \quad J_{zx} = \sum m_i z_i x_i, \quad (\text{ПЗ.2})$$

или соответствующими объёмными интегралами. Эти величины являются характеристиками динамической неуравновешенности тела. Например, при вращении тела вокруг оси z от значений J_{xz} и J_{yz} зависят силы давления на подшипники, в которых закреплена ось.

Момент инерции относительно параллельных осей z и z' связаны соотношением (теорема Гюйгенса)

$$J_z = J_{z'} + Md^2, \quad (\text{ПЗ.3})$$

где z' - ось, проходящая через центр массы тела, d - расстояние между осями.

Момент инерции относительно любой проходящей через начало координат O оси $O1$ с направляющими косинусами a, b, g находится по формуле:

$$J_{O1} = J_x \times \alpha^2 + J_y \times \beta^2 + J_z \times \gamma^2 - 2J_{xy} \times \alpha \times \beta - 2J_{yz} \times \beta \times \gamma - 2J_{zx} \times \gamma \times \alpha. \quad (\text{ПЗ.4})$$

Зная шесть величин $J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{yz}, J_{zx}$, можно последовательно, используя формулы (ПЗ.3) и (ПЗ.4), вычислить всю совокупность момента инерции тела относительно любых осей. Эти шесть величин определяют так называемый тензор инерции тела. Через каждую точку тела можно провести 3 такие взаимно перпендикулярные оси, называется главными осями инерции, для которых $J_{xy} = J_{yz} = J_{zx} = 0$. Тогда момент инерции тела относительно любой оси можно определить, зная гл. оси инерции и момент инерции относительно этих осей. Момент инерции тел сложной конфигурации обычно определяют экспериментально.

Определение момента инерции вращающейся части

Для определения момента инерции применяют следующие методы:

- крутильных колебаний;
- вспомогательного маятника;
- самоторможения.

Метод крутильных колебаний

Метод крутильных колебаний следует предпочтительно применять для определения момента инерции вращающихся частей электрических машин мощностью до 100 кВт.

Вращающуюся часть следует подвесить на металлической струне или на струне из иного высокопрочного материала с изотропной структурой (Рис.ПЗ.9). Диаметр и длину струны выбирают так, чтобы период крутильных колебаний T был не менее 1 с. Механическая прочность струны должна соответствовать массе вращающейся части. Точка подвеса должна находиться точно на ее оси вращения.

Вращающуюся часть следует подвергнуть крутильным колебаниям и определить их период T . При этом одностороннее угловое отклонение должно составлять не более 25° .

Таким же образом и на той же струне следует определить период крутильных колебаний T_n эталона, момент инерции которого определяют расчетным путем. Момент инерции исследуемой вращающейся части $I, \text{Н}\cdot\text{м}^2$, вычисляют по формуле

$$J = J_H \left(\frac{1}{T - T_H} \right), \quad (\text{ПЗ.5})$$

где J_H — момент инерции эталона, Нм,

T — период колебаний исследуемой вращающейся части, с,

T_H — период колебаний эталона, с.

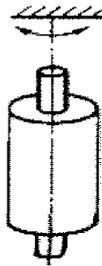


Рис. ПЗ.9

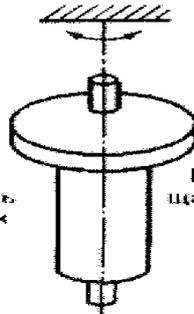


Рис. ПЗ.10

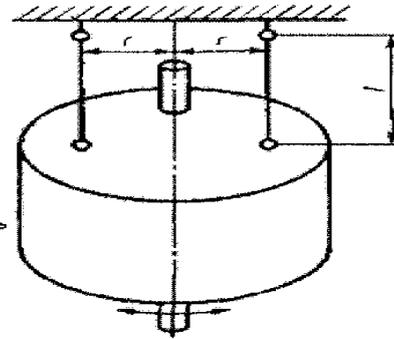


Рис. ПЗ.11

Эталон, момент инерции которого определен расчетным путем, может быть также закреплен на валу исследуемой вращающейся части, как показано на рис.ПЗ.10. В этом случае момент инерции исследуемой вращающейся части J следует вычислять по формуле

$$J = \frac{J_H \times T^2}{T_{\text{чн}}^2 - T^2}, \quad (\text{ПЗ.6})$$

где $T_{\text{чн}}$ — период колебаний исследуемой вращающейся части с эталоном, с.

Более тяжелые вращающиеся части могут быть подвешены на двух параллельных струнах, прикрепленных к вращающейся части симметрично относительно ее оси, в соответствии с рис. ПЗ.11. Длину струн l и расстояния от струн до оси вращающейся части r следует выбирать таким образом, чтобы период крутильных колебаний T составлял не менее 1 с.

Вращающуюся часть необходимо подвергнуть крутильным колебаниям и измерить их период T . Кроме того, надлежит определить массу вращающейся части m . Момент инерции исследуемой вращающейся части I , Н-м², вычисляют по формуле

$$J = \frac{m \times r^2}{l} \times T^2 \times \frac{g}{4\pi^2}, \quad (\text{ПЗ.7})$$

где m — масса исследуемой вращающейся части, кг;

r — расстояние от струн до оси вращающейся части, м;

l — длина струн, м;

T — период крутильных колебаний вращающейся части, с;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение земного тяготения.

Метод вспомогательного маятника

Метод вспомогательного маятника может применяться для определения момента инерции вращающихся частей машин мощностью от 10 до 1000 кВт. Для вращающихся частей, для которых также применим метод крутильных колебаний, последний является предпочтительным. Вращающуюся часть следует установить на подшипниках балансировочного станка. Вращающиеся части с подшипниками качения могут быть установлены также на собственных подшипниках. Если испытание проводится в собранной машине, то в случае двигателей с фазным ротором и коллекторных машин следует поднять щетки. Для определения момента инерции методом вспомогательного маятника следует прикрепить к валу исследуемой вращающейся части дополнительную массу $m_{\text{доп}}$ посредством рычага, как показано на рис. П3.12. Эту массу следует выбрать таким образом, чтобы масса рычага была пренебрежимо малой по сравнению с дополнительной массой.

Дополнительная масса может быть закреплена также на наружной поверхности самой вращающейся части, на шкиве или на полумуфте. Вспомогательный маятник должен быть рассчитан таким образом, чтобы период колебаний T составлял от 3 до 8 с.

Вращающуюся часть совместно с прикрепленным к ней вспомогательным маятником приводят в колебание. При этом одностороннее угловое отклонение не должно быть более 15° .

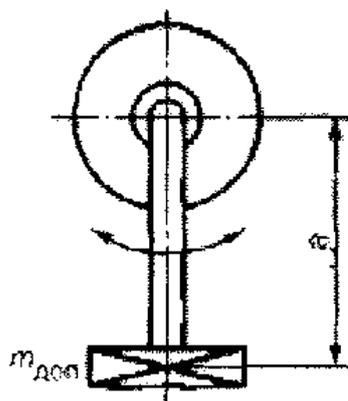


Рис. П 3.12. К методу вспомогательного маятника

Период колебаний T следует определить как средний из нескольких колебаний. Для обеспечения точности измерения периода колебаний его следует проводить между моментами прохождения маятника через положение статического равновесия.

Момент инерции испытуемой вращающейся части вычисляют по формуле

$$J = m_{\text{доп}} \times \alpha \left[\frac{T^2 \times g}{4\pi^2} - \alpha \right], \quad (\text{ПЗ.8})$$

где $m_{\text{доп}}$ — масса вспомогательного маятника, кг;

a — расстояние от центра тяжести вспомогательного маятника до оси вала вращающейся части, м;

T — период колебаний маятника, с; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение земного тяготения. Для проверки полученного значения момента инерции опыт необходимо повторить с дополнительной массой другой величины.

Метод самоторможения

Метод самоторможения может применяться для определения момента инерции вращающихся частей электрических машин мощностью свыше 100 кВт. Согласно этому методу машина с испытуемой вращающейся частью приводят во вращение с частотой n выше номинальной при номинальном возбуждении или без него и затем отключается от источника питания. Для машин с фазным ротором и коллекторных машин испытание проводится с минимально необходимым количеством щеток, а остальные щетки надлежит поднять. После отключения определяется кривая самоторможения $n = f(t)$ в диапазоне частоты вращения от $1,2 n_{\text{ном}}$ до $0,8 n_{\text{ном}}$. Для достижения возможной точности при определении этой кривой снижение частоты вращения следует осциллографировать. В соответствии с рис. ПЗ.13 момент инерции J испытуемой вращающейся части для невозбужденной машины вычисляют по формуле (ПЗ.9).

$$J = \left[\frac{30}{\pi} \right]^2 \times \frac{P_{\text{мех}} \times \Delta t}{n_{\text{ном}} \times \Delta n} = \frac{P_{\text{мех}} \times \Delta t}{\omega_{\text{ном}} \times \Delta \omega}. \quad (\text{ПЗ.9})$$

Для возбужденной машины момент инерции определяется по формуле:

$$J = \left[\frac{30}{\pi} \right]^2 \times \frac{(P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}) \times \Delta t}{n_{\text{ном}} \times \Delta n} = \frac{(P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}) \times \Delta t}{\omega_{\text{ном}} \times \Delta \omega}, \quad (\text{ПЗ.10})$$

где $P_{\text{мех}}$ — механические потери при номинальной частоте вращения, Вт;

$P_{\text{ст}}$ — потери в стали при номинальной частоте вращения, Вт;

$n_{\text{ном}}$ — номинальная частота вращения, мин^{-1} ;

D_n — разность между верхним и нижним значениями частоты вращения в опыте, мин^{-1} ;

D_t — время, в течение которого частота вращения машины изменяется на D_n , с;

$\omega_{\text{ном}}$ — номинальная угловая частота вращения, с^{-1} ;

D_ω — разность между верхним и нижним значениями угловой частоты вращения, с^{-1} .

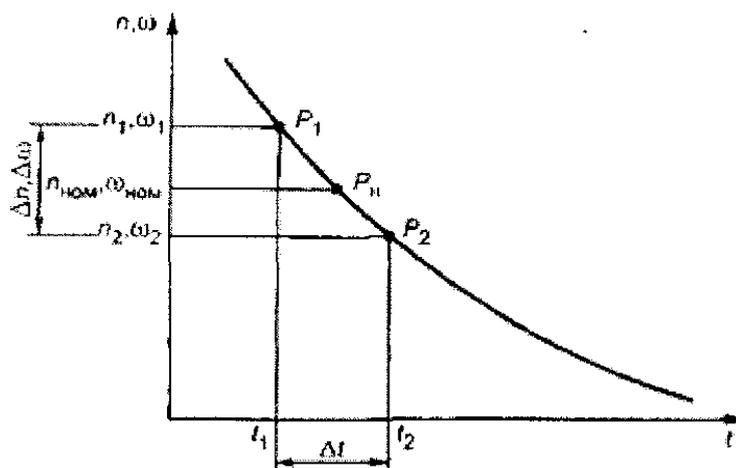


Рис. ПЗ.13. К вычислению момента инерции

За верхнюю точку частоты вращения принимают наивысшую возможную точку в опыте, но не менее $1,1 n_{\text{ном}}$. Нижняя точка должна отличаться от номинальной на такую же величину частоты вращения.

В случае невозможности повышения частоты вращения сверх номинального значения вместо номинальной частоты вращения принимается частота вращения, лежащая на участке примерно от 0,9 до 0,8 номинальной частоты вращения. В этом случае потери должны быть измерены на данной частоте вращения.

Из полученного таким образом момента инерции J следует вычесть момент инерции вращающейся части приводного двигателя и соединительной муфты, подлежащей отдельному определению.

Выполнение работы

С помощью оболочки Combivis для преобразования КЕВ задаем частоту (ор.03) вращения и время разгона (ор.28).

Обратная связь по скорости должна быть замкнута (cs.00=4).

1. Определение суммарного момента инерции приведенного к валу двигателя по характеристике разгона.

1.1. Определяем момент сопротивления по заданной частоте вращения. Задаём частоту вращения равную 1500 об/мин, скорость разгона в ОР. $t_3 = 5$ секунд.

1.2. С помощью Combivis запускаем электрический осциллограф (4 луча: скорость энкодера, ru 09; фактический момент вращения, ru 12; ток, ru 15; мощность, ru 18.).

1.3 Ставим вертикальный курсор 1 на характеристику разгона и ставим вертикальный курсор 2 на характеристику установившегося режима работы двигателя. Программа Combivis определяет разности $M - M_c$; Δn ; Δt .

2. Определяем суммарный момент инерции методом самоторможения с использованием выражения:

$$J = \frac{M - M_c}{\frac{\Delta n}{\Delta t} \times \frac{\pi}{30}}$$

3. Определяем время разгона при заданном токоограничении.

Далее необходимо привести осциллограммы при разных заданиях времени разгона.

Вопросы для самопроверки к практическому заданию ПЗ.2:

1. Методы определения момента инерции.
2. Приведение моментов инерции и моментов сопротивления к валу двигателя.
3. Основное уравнение движения электропривода.
4. Метод самоторможения.
5. Метод крутильных колебаний.

Задание ПЗ.3 Построить характеристики электрической машины постоянного тока независимого возбуждения в режиме двигателя и генератора с использованием её виртуальной модели.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал раздела 3: машины постоянного тока - конструкция, принцип действия, ЭДС вращения и момент, потери мощности.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

Содержание работы

1. Построение механической и расчет рабочих характеристик машины в двигательном режиме работы.

2. Построение механической и расчет рабочих характеристик машины в генераторном режиме работы.
3. Построение механических характеристик при различных напряжениях питания в цепи якоря.
4. Построение механических характеристик при различных сопротивлениях в цепи якоря.
5. Построение механических характеристик при различных потоках возбуждения.
6. Построение регулировочных характеристик при изменении напряжения якоря.

Описание виртуальной установки.

Виртуальная модель установки для выполнения задания представлена на рис. ПЗ.14. Она включает источники постоянного напряжения ($V1$, для питания якоря машины, $V2$ для питания обмотки возбуждения из библиотеки Power System Blockset/Electrical Sources), блок *Moment* для задания момента нагрузки (блок *Constant* из библиотеки Simulink/Sources), саму машину постоянного тока (блок DC Machine из библиотеки Power System Blockset/Machines), блок для измерения переменных состояния машины *Display* и осциллограф *Scope* для визуального наблюдения процессов из библиотеки Simulink/Sinks. Цепь якоря и цепь возбуждения видны из графического начертания блока, на вход TL подается момент нагрузки, выход m предназначен для измерения и наблюдения переменных состояния машины и следующей последовательности: угловая скорость (рад/с), ток якоря в (А), ток возбуждения (А), электромагнитный момент (Нм).

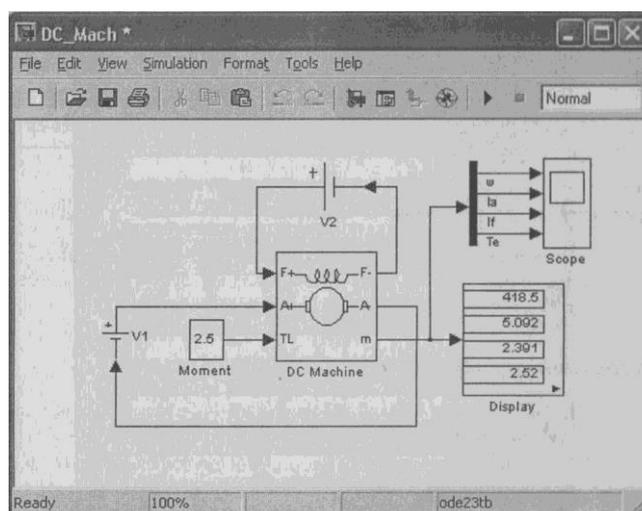


Рис. ПЗ.14. Модель для исследования машины постоянного тока

с независимым возбуждением

В полях настройки машины (рис. ПЗ.15) задаются:

- параметры обмотки якоря – R_a (Ом), L_a (Гн); параметры обмотки возбуждения – R_f (Ом), L_f (Гн); коэффициент L_{af} ;
- суммарный момент инерции машины и нагрузки – J (кГм²). Следует подчеркнуть, что параметры (L_f, J) важны при исследовании переходных процессов. На установившиеся режимы они не влияют;
- коэффициент вязкого трения — B_m (Нмс); коэффициент сухого трения — T_f (Нм); начальная скорость.

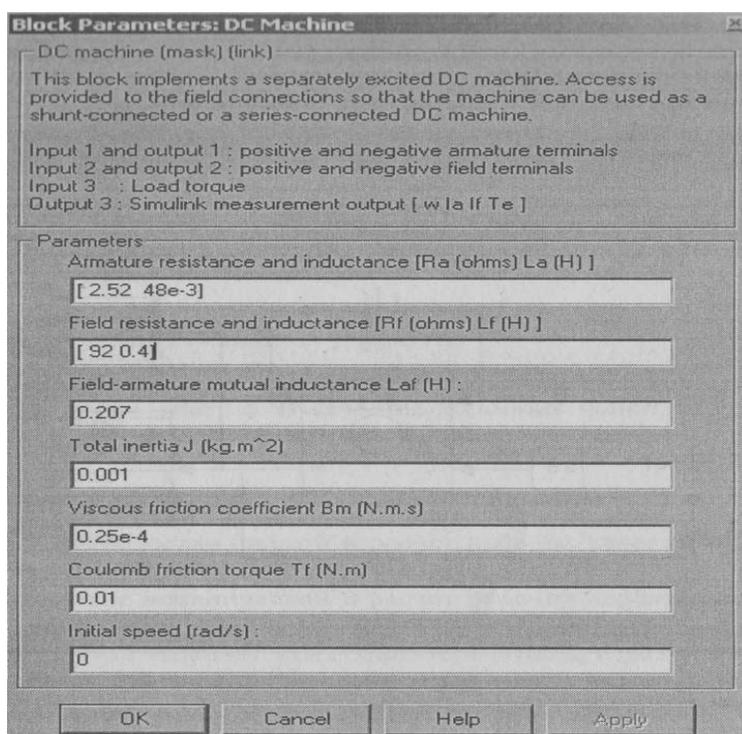


Рис. ПЗ.15. Окно настройки параметров машины постоянного тока

Все эти параметры рассчитываются по выражениям:

- взаимная индуктивность между обмотками возбуждения и якоря для машины с независимым возбуждением определяется последовательным расчетом, используя следующие выражения

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi n_H}, \quad I_{я.н.} = \frac{P_H}{U_{я.н.} \eta_H} - I_B, \quad L_{af} = \frac{M_H}{I_{я.н.} I_B}; \quad (\text{ПЗ.11})$$

- индуктивность обмотки возбуждения при исследовании установившихся процессов может быть принята близкой к нулю. При

исследовании переходных процессов значение L_B для машин обычного исполнения выбирается из неравенства

$$L_B \geq (2 - 5) \frac{L_{я} R_{\epsilon}}{R_{я}}; \quad (\text{ПЗ.12})$$

• момент инерции для двигателей обычного исполнения определяется из неравенства

$$J = \frac{(5 - 10) L_{я} P_H^2}{R_{я}^2 \omega_H^2 I_{я.н}^2}; \quad (\text{ПЗ.13})$$

• момент сухого трения и коэффициент вязкого трения определяются из следующих соображений. Общие механические потери для машин обычного исполнения составляют $\Pi_{\text{мех}} = (0,5 - 2\%) P_H$. Кроме того эти потери равны $\Pi_{\text{мех}} = T_f \omega_H + B_m \omega_H^2$. Если считать, что потери на трение и вентиляционные потери приблизительно равны, то

$$T_f = \frac{\Pi_{\text{мех}}}{2\omega_H}. \quad (\text{ПЗ.14})$$

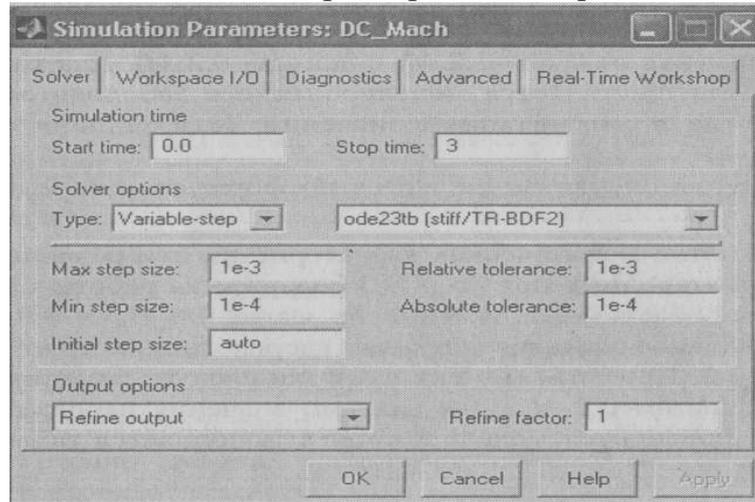
Паспортные параметры машин постоянного тока приведены в табл. ПЗ.1.

Таблица ПЗ.1. Паспортные параметры машин постоянного тока

Тип двигателя	P_n кВт	U_n В	n_n об./мин	η_n %	$R_{я}$ Ом	R_{ϵ} Ом	$L_{я}$ мГн
1	2	3	4	5	6	7	8
2ПН-0.17	0.17	220	750	48.5	27.2	162	514
2ПН-0.25	0.25	220	1120	57	15.47	612	297
2ПН-0.37	0.37	220	1500	61.5	10.61	612	190
2ПН-0.71	0.71	220	2360	70	3.99	123	70
2ПН-1.0	1.0	220	3000	72.5	2.52	92	48

Окно настройки параметров моделирования показано на рис.6.3.

Рис. ПЗ.16. Окно задания параметров моделирования



Порядок выполнения задания

1. Для заданной преподавателем (или выбранной при самостоятельной работе) машины рассчитать значение параметров и заполнить поля окна настройки параметров машины.
2. Задать параметры моделирования (рис. ПЗ.16).
3. При снятии характеристик в окне настройки блока *Moment* последовательно задаются значения момента от 0 до 1,2 M_n с шагом 0,2 M_n . Для каждого значения момента осуществляется моделирование и заполняется таблица ПЗ.2 измеренных и рассчитанных значений.

Таблица ПЗ.2. Измеренные и рассчитанные значения

Задание	Измерения			Расчет		
	ω , рад/с	I_a , А	I_b , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η
M , Нм						

Вычисления осуществляются по выражениям:

$$P_1 = U(I_a + I_b), \quad P_2 = M_n \omega, \quad \eta = \frac{P_1}{P_2}.$$

4. Коэффициент полезного действия в этом случае вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}.$$

5. Построение механических характеристик при различных напряжениях питания в цепи якоря следует провести для двух значений напряжения на якоре 0,6 U_a и 0,8 U_a , где U_a — первоначальное напряжение на якоре. При этом момент нагрузки следует изменять от -

1,2 M_n до 1,2 M_n с шагом 0,2 M_n . Для каждого значения напряжения на якоре и момента проводится моделирование и заполняется таблица ПЗ.3.

Таблица ПЗ.3

М, Нм	ω , рад/с

6. Построение механических характеристик при различных сопротивлениях в цепи якоря следует провести для двух значений сопротивления якоря $2R_{я}$ и $4R_{я}$, где $R_{я}$ первоначальное значение сопротивления. Изменение сопротивления якоря осуществляется в поле окна настройки параметров машины. При этом момент нагрузки следует изменять от -1,2 M_n до 1,2 M_n с шагом 0,2 M_n . Для каждого значения сопротивления якоря и момента проводится моделирование и заполняется таблица 6.3.

7. Построение механических характеристик при различных потоках возбуждения следует провести для двух значений потока 0,6 Φ_n и 0,8 Φ_n . Для этого в поле *Field-armature mutual inductance* необходимо установить значение L_{af} вначале 0,6, а затем 0,8 от первоначальной величины.

8. При этом момент нагрузки следует изменять от -1,2 M_n до 1,2 M_n с шагом 0,2 M_n . Для каждого значения потока и момента проводится моделирование и заполняется таблица ПЗ.3.

9. Снятие регулировочных характеристик при изменении напряжения якоря проводится для постоянного момента нагрузки, равного номинальному, и изменению напряжения в цепи якоря от 0,4 до 1,2 исходного значения с шагом 0,2 исходного значения напряжения. Для каждого значения напряжения проводится моделирование и заполняется таблица ПЗ.4.

Таблица ПЗ.4

$U_{я}$, В	ω , рад/с

Содержание отчета

1. Схема модели для проведения работы.
2. Расчетные формулы параметров машины.
3. Расчетные формулы для мощностей P_1 , P_2 и КПД.
4. Заполненные таблицы.

5. Графики рабочих характеристик машины в двигательном и генераторном режимах.
6. Графики механической характеристики машины при различных напряжениях на якоре.
7. Графики механической характеристики машины при различных сопротивлениях якоря.
8. Графики механической характеристики машины при различных потоках.
9. Регулировочная характеристика двигателя.

Вопросы для самопроверки к практическому заданию ПЗ.3:

1. Что называется механической характеристикой двигателя?
2. Какие рабочие характеристики определяются для машин постоянного тока?
3. Какие особенности имеют рабочие характеристики генераторов?
4. Как зависит вид механической характеристики от способа возбуждения?
5. Что называется регулировочной характеристикой двигателя?

Глава 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В АВТОМОБИЛЯХ

Как отмечалось в главе 1, электрические машины постоянного тока используются в различных приводах автомобиля: в стартере, электроусилителях руля, стеклоочистителе, вентиляторах, отопителе и других устройствах. Рассмотрим устройство приводов и особенности их работы.

4.1. Стартер автомобиля

4.1.1. Устройство и работа стартера

Основным узлом системы запуска двигателя является **стартер**. Представляет собой электродвигатель постоянного тока напряжением 12, 24 или 36 вольт и, развивающий на холостом ходу примерно 5000 об/мин. Устройство типового стартера представлено на рис. 4.1, где обозначено: 1 — вал якоря; 2 — рычаг привода; 3 — контакт подключения положительного провода; 4 - втягивающее реле; 5 — коллектор;

6 — щеткодержатель; 7 — якорь; 8 — индуктор; 9 — планетарный редуктор (в редукторном стартере для двигателей большой мощности); 10 — пружина; 11 — муфта свободного хода (обгонная муфта); 12 — приводная шестерня.

Стартер состоит из пяти основных элементов:

1. **Корпус стартера** выполнен из стали, имеет форму цилиндра. На внутреннюю стенку корпуса крепятся постоянные магниты или обмотки возбуждения (обычно четыре) совместно с сердечниками (полюсами). Крепеж происходит винтовым соединением. Винт закручивается в сердечник, который прижимает обмотку к стенке. Корпус имеет резьбовые технологические отверстия для крепления передней части, в которой происходит движение обгонной муфты.
2. **Якорь стартера** представляет собой ось из легированной стали, на которую запрессован сердечник якоря и коллекторные пластины. Сердечник имеет пазы для укладки обмоток якоря. Концы обмоток надежно крепятся к коллекторным пластинам. Коллекторные пластины расположены по кругу и жестко установлены на диэлектрической основе. Диаметр сердечника напрямую связан с внутренним диаметром корпуса (совместно с обмотками). Якорь крепится в передней крышке стартера и в задней крышке при помощи втулок, изготовленных из латуни, реже из меди. Втулки одновременно являются и подшипниками.

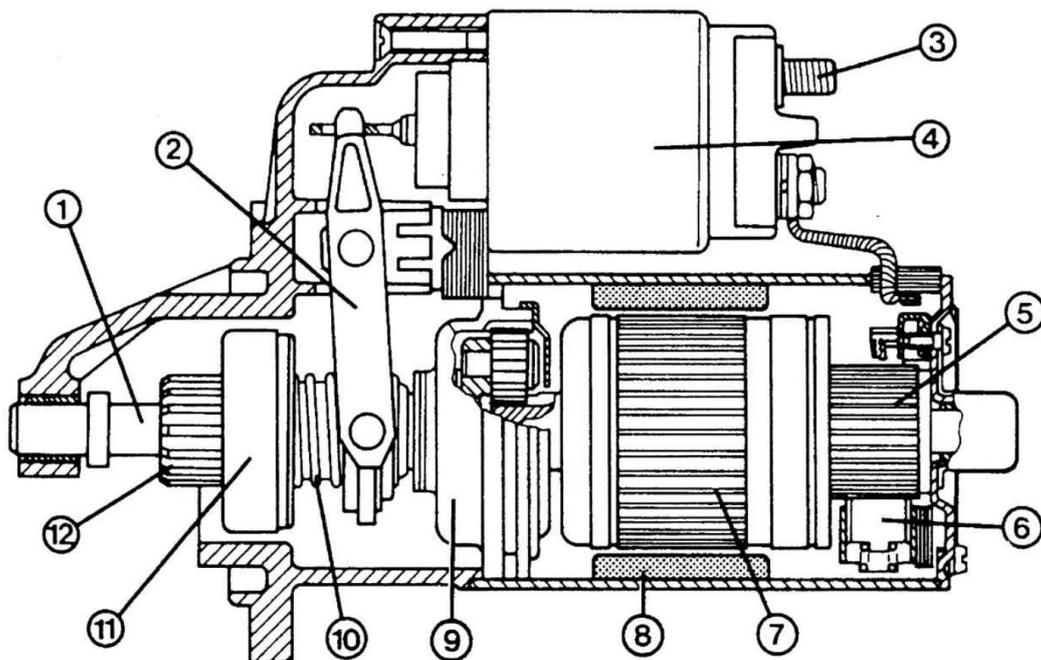


Рис. 4.1. Устройство типового стартера

3. **Втягивающее реле** или тяговое реле устанавливается на корпус стартера. В корпусе тягового реле, в задней части находятся силовые контакты – «пятаки», и подвижный контакт-перемычка, выполненные из мягких металлов. «Пятаки» представляют собой обыкновенные болты, запрессованные в эбонитовую крышку тягового реле. При помощи гаек к ним крепятся силовые провода от аккумулятора и от плюсовых щеток стартера. Сердечник тягового реле соединяется, через подвижное «коромысло» с обгонной муфтой, в простонародье именуемой бендиксом.
4. **Обгонная муфта (бендикс)** крепится подвижно на вал якоря и представляет собой роликовый механизм, который связан с шестерней зацепления с венцом маховика. Конструкция собрана так, что при подаче крутящего момента на бендикс в одну сторону, ролики, находящиеся в сепараторе выходят из пазов сепаратора и жестко фиксируют шестерню к наружной обойме. При вращении в противоположную сторону ролики западают в сепаратор, и шестерня вращается независимо от наружной обоймы.
5. **Щеткодержатель** элемент стартера, через который подается рабочее напряжение на медно-графитные щетки, а затем передается на коллекторные пластины якоря. Выполнен щеткодержатель в виде диэлектрической обоймы с металлическими вставками, внутри которых находятся щетки. Контакты щеток (мягкий многожильный провод) при помощи точечной сварки привариваются к полюсным пластинам. Полюсными пластинами обычно являются «хвосты» обмоток возбуждения.
6. **Планетарный редуктор** (в редукторном стартере). В стартер может быть встроен дополнительный редуктор, если передаточное число от шестерни привода к венцу маховика недостаточно. Параметром, определяющим рациональное согласование мощностной характеристики электропускового устройства с пусковыми характеристиками ДВС, является передаточное число привода от стартера к двигателю. Этот параметр оказывает влияние на угол наклона механической характеристики стартерного электродвигателя, приведенной к коленчатому валу ДВС. Для каждого двигателя и заданных условий пуска существуют оптимальные передаточные числа, при которых наилучшим образом используются мощностные характеристики пускового устройства. Однако при безредукторной передаче передаточное число может быть не более 16, что ограничивается условиями механической прочности ведущей шестерни стартера. С

другой стороны, увеличение передаточного числа позволяет уменьшить размеры и соответственно массу электродвигателя стартера, так как эти параметры изменяются обратно пропорционально частоте вращения вала. Последние годы одним из главных направлений совершенствования систем пуска является уменьшение массы активных материалов, стоимость которых составляет около 50% себестоимости стартера. При этом, помимо использования таких известных методов, как замена медных проводов обмоток на более легкие алюминиевые и уменьшение габаритов за счет применения изоляции более высокого класса нагревостойкости, все более широко стали применяться высокооборотные малогабаритные стартерные электродвигатели с встроенным редуктором.

Этапы работы стартера следующие: стыковка с зубчатым венцом маховика, пуск стартера, расстыковка стартера. Работа происходит следующим образом: при включении замка зажигания и повороте ключа в положение «запуск», по цепи «+» АКБ - замок зажигания - обмотка тягового реле - «+» выхода стартера - плюсовая щетка - обмотка якоря - минусовая щетка, срабатывает тяговое реле. Под действием сердечника реле подвижный контакт замыкает силовые пятаки, через которые подается ток от АКБ на плюсовой провод стартера. Плюс стартера соединен с плюсовой полюсной пластиной и плюсовыми щётками. Минус по умолчанию подключен постоянно. После подачи тока вокруг обмоток якоря и обмоток возбуждения возникают магнитные потоки, которые направлены в одну сторону, а, как известно, одинаковые полюса магнита отталкиваются друг от друга, так возникает круговое движение якоря. В момент срабатывания втягивающего реле, «коромысло» приходит в движение вместе сердечником реле и выталкивает бендикс на шлицах якоря, в сторону венца маховика. Якорь в этот момент начинает вращаться и приводит в действие маховик. Если двигатель автомобиля завелся, а ключ зажигания еще не отпущен, наступает момент, когда обороты двигателя превышают обороты стартера, в этом случае срабатывает обгонный механизм бендикса. Для дизельных двигателей или двигателей большой мощности, применяется другой механизм подачи вращения на бендикс. Применяется редуктор, встроенный в корпус стартера. Редуктор представляет собой механизм привода трансмиссии, т.е. по внутренней зубчатой обойме вращаются три сателлита, которые и приводят в действие вал, на котором подвижно находится бендикс. Достоинство таких стартеров в малых габаритах и большой мощности.

4.1.2. Основные расчетные зависимости работы стартера

Характеристиками пусковых систем ДВС являются по существу характеристики электродвигателя стартера. Это зависимости мощности, частоты вращения якоря и крутящего момента стартера от силы тока, потребляемого стартером. Однако данные зависимости не только определяются характеристиками самого электродвигателя, обусловленными особенностями и конструкцией. Большое влияние, как важнейший элемент пусковой системы, оказывает аккумуляторная батарея, так как является источником ограниченной мощности и напряжение на ее выводах величина не постоянная, а падает с увеличением нагрузки. Если принять во внимание то обстоятельство, что в стартерах применяются электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения, то для описания выходных характеристик систем пуска можно использовать известные в электротехнике формулы. Крутящий момент $M_{ст}$, развиваемый стартером, определяется по выражению:

$$M_{ст} = M_{эм} - M_{мех} = \frac{pN}{2\pi a} I\Phi - M_{мех} = C_m I\Phi - M_{мех}, \quad (4.1)$$

где $M_{эм}$ — электромагнитный крутящий момент; $M_{мех}$ — механические потери на трение в подшипниках и щетках; p — число пар полюсов; N — число проводов обмотки якоря; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря; I — ток якоря; Φ — основной магнитный поток, проходящий через воздушный зазор и якорь стартера; C_m — коэффициент.

Величину механических потерь с некоторым приближением можно считать постоянной. Тогда величина крутящего момента определяется конструктивными параметрами, влияющими на коэффициент C_m , и значениями магнитного потока возбуждения и тока якоря электродвигателя. Частота вращения якоря n может быть определена из формулы обратной ЭДС $E_{обр}$, индуктируемой в обмотке якоря:

$$E_{обр} = \frac{pN}{a \cdot 60} n\Phi = C_m n\Phi. \quad (4.2)$$

Для электрической цепи электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения, к которому приложено напряжение аккумуляторной батареи, согласно второму закону Кирхгофа можно записать:

$$U_б = E_{обр} + IR_{пр} + IR_{об} + IR_{щ} = E_{обр} + IR, \quad (4.3)$$

где $U_б$ — напряжение аккумуляторной батареи; $R_{пр}$ — сопротивление подводящих проводов; $R_{об}$ — сопротивление обмоток электродвигателя стартера; $R_{щ}$ — переходное сопротивление в месте контакта

щеток и коллектора; R — сопротивление электрической цепи, зависящее от $R_{пр}$, $R_{об}$ и $R_{щ}$.

Подставим значение обратной ЭДС, полученное из последнего уравнения в формулу, определяющую обратную ЭДС, и выразив из нее частоту вращения, получим:

$$n = \frac{E_{обр}}{C_M \Phi} = \frac{U_б - IR}{C_M \Phi} \quad (4.4)$$

Из полученного выражения видно, что частота вращения якоря тем больше, чем больше напряжение аккумуляторной батареи и чем меньше падение напряжения в цепи стартера и величина магнитного потока. Используя зависимости между частотой вращения якоря и моментом стартера, можно построить зависимость характеристик в функции тока стартера (рис.4.2).

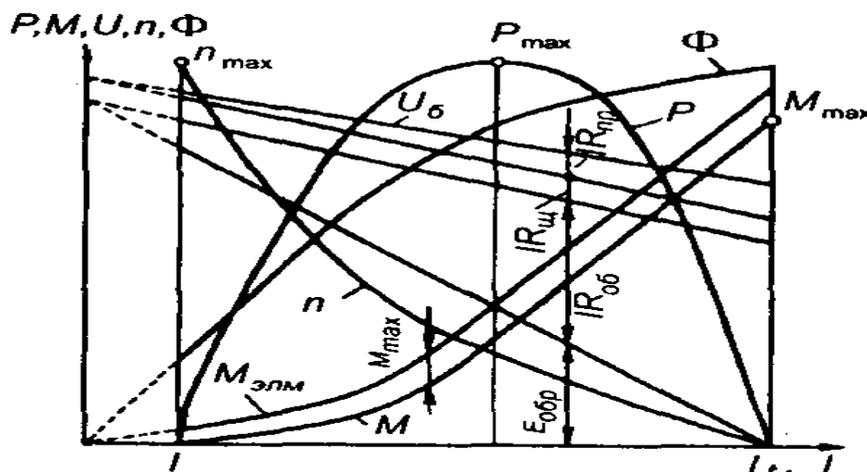


Рис. 4.2. Характеристики стартера в функции тока стартера

Примем, что напряжение аккумуляторной батареи уменьшается с увеличением нагрузки линейно. Очевидно, что ток стартера будет нарастать от нуля до максимального значения, которое возникает при полном затормаживании вала якоря, когда частота вращения и обратная ЭДС равны нулю. Этот ток называют током полного торможения (I_T). Напряжение на стартере будет меньше напряжения аккумуляторной батареи на величину падения напряжения в подводящих проводах ($IR_{пр}$). Известно, что падение напряжения на щетках ($IR_{щ}$) можно принять постоянным. Оставшееся напряжение распределится между падением напряжения на обмотках электродвигателя ($IR_{об}$) и обратной ЭДС ($E_{обр}$). Магнитный поток стартера Φ при увеличении тока изменяется соответственно кривой намагничивания. При малых нагрузках он пропорционален току, а при больших приближается к магнитному

потоку насыщения и растет очень медленно. Поэтому при больших нагрузках его можно считать постоянным. Тогда электромагнитный момент $M_{эм}$ сначала будет расти по параболе, а при больших нагрузках - пропорционально току. Крутящий момент на валу стартера $M_{ст}$ будет меньше электромагнитного на величину механических потерь $M_{мех}$.

Значение тока холостого хода $I_{хх}$, при котором $M_{эм} = M_{мех}$, соответствует режиму холостого хода. В этом режиме момент на валу стартера равен нулю и поэтому частота вращения якоря максимальна. Затем при малых нагрузках частота вращения уменьшается приблизительно по гиперболе, так как магнитный поток увеличивается линейно, а обратная ЭДС уменьшается. В зоне больших нагрузок, где магнитный поток можно считать постоянным, график уменьшения частоты вращения приближается к абсциссе. В режиме полного торможения - зона токов, меньших тока холостого хода, зависимости выходят за пределы режима работы стартера (пунктирные линии на рис.4.2). Механическая мощность на валу стартера определяется выражением:

$$P = M_{ст} \frac{2pn}{60}. \quad (4.5)$$

В режиме холостого хода, когда $M_{ст} = 0$ и в режиме полного торможения, когда $n = 0$, механическая мощность стартера равна нулю. Кривая $P=f(I)$ идет вверх от нуля при $I = I_{хх}$ к максимуму (P_{max}) при $I = 0,5I_{хх}$, а затем снова снижается к нулю при $I = I_{хх}$.

4.2. Электропривод стеклоочистителей автомобиля

4.2.1. Устройство типовых стеклоочистителей

Электропривод, включающий электродвигатели постоянного тока, редукторы (моторредукторы) и дополнительные механизмы преобразования движения, применяют в стеклоочистителях ветрового и заднего стекла, а также в фароочистителях автомобилей.

Щетки очистителей ветровых стекол могут перемещаться параллельно с одинаковыми и разными углами поворота или на встречу друг другу (Рис. 4.3). Разновидностью стеклоочистителей со встречным движением щеток являются стеклоочистители с пантографом. Используются также стеклоочистители с одной щеткой.

В разное время на автомобилях использовались гидравлический, вакуумный и пневматический тип привода. Сами же щетки стеклоочистителей изменялись очень медленно и касалось это, в основном, профиля резиновой ленты. Усовершенствование существующих стеклоочисти-

телей и стеклоомывателей коснулось в основном автоматизации системы управления, т.е. цикличности включения-выключения при загрязнении ветрового стекла. Традиционная автоматизация направлена на освобождение водителя от довольно частых операций по включению-выключению этих приборов, особенно при езде по мокрой дороге или при морозящем дожде, когда лобовое стекло загрязняется мелкими каплями грязной воды, вылетающей из-под колес встречных и попутных автомобилей.

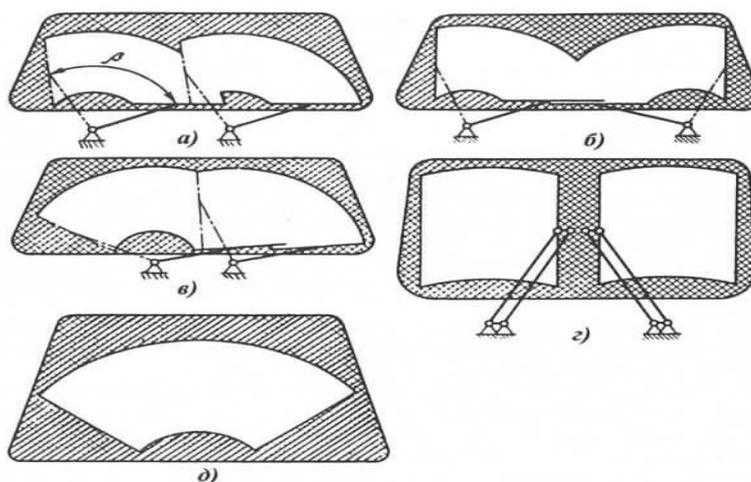


Рис. 4.3. Зоны очистки ветрового стекла

а, б - при параллельном и встречном движении щеток; в - при параллельном движении щеток с разными углами поворота; г - при использовании пантографа; д - при движении одной щетки

Стеклоочиститель может иметь электрическое или электронное управление. Электрическое управление представляет собой электрическую цепь, включающую подрулевой переключатель и реле. Переключатель предусматривает несколько непрерывных (низкая и высокая скорость) и несколько прерывистых (дискретных) режимов.

Более совершенным является электронное управление стеклоочистителем, которое помимо традиционных режимов (непрерывное и прерывистое движение щеток) может обеспечивать ряд дополнительных функций:

- автоматическое включение стеклоочистителя;
- автоматическое изменение режимов движения щеток в зависимости от количества воды на стекле;
- блокировка щеток при распознавании препятствия на стекле;
- сервисное (для замены и очистки) и зимнее (предотвращает примерзание) положение щеток при выключенном двигателе;

- отключение стеклоочистителя при открытом капоте автомобиля;

- удаление щеток с поля зрения водителя после окончания очистки стекла;

дополнительная очистка стекла при окончании пользования стеклоомывателем (удаление подтеков).

Автоматическое регулирование работы стеклоочистителя производится с помощью датчика дождя. Датчик дождя устанавливается с внутренней стороны ветрового стекла рядом с зеркалом заднего вида. Конструктивно датчик объединен с датчиком освещенности (находятся в одном корпусе). Устройство типового стеклоочистителя ветровых стекол приведено на рис. 4.4. Здесь обозначено: 1 – гайка крепления рычага; 2 – поводок рычага; 3 – защитная гайка; 4, 30 – подшипники; 5 – гайка крепления штуцера; 6, 12 – тяги; 7 – штуцер; 8 – вал рычага; 9 – электродвигатель; 10 – резистор; 11 – биметаллический предохранитель; 13 – кронштейн крепления; 14 – контактный диск; 15 – червячная шестерня; 16 – заглушка; 17 – упорный шарик; 18 – корпус редуктора; 19 – червяк; 20 – соединительная муфта;

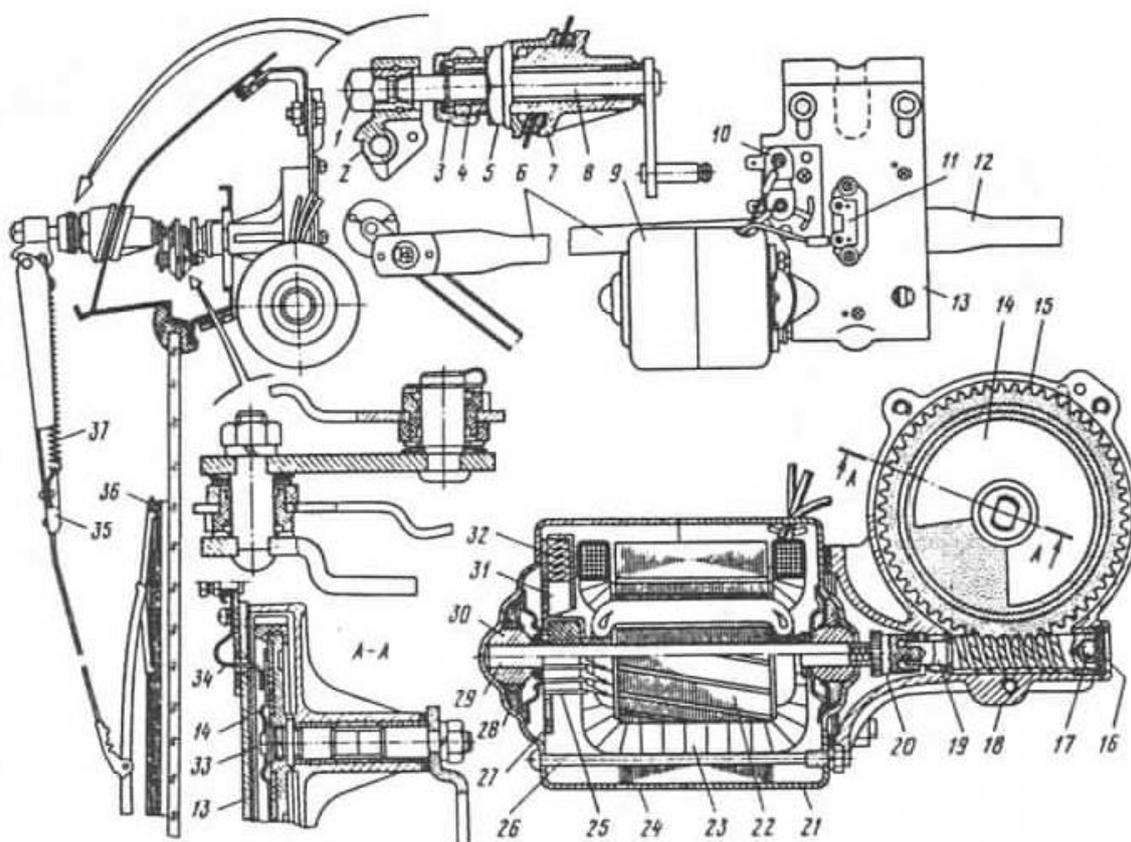


Рис. 4.4. Устройство типового стеклоочистителя ветровых стекол

21,24 – крышка электродвигателя; 22 – якорь; 23 – обмотка возбуждения; 25 – коллектор; 26 – стяжной винт; 27 – панель щеткодержателя; 28 – фетровая шайба запасом смазочного материала; 29 – вал электродвигателя; 31 – щетка электродвигателя; 32,37 – пружины; 33 – вал редуктора; 34 – контакт концевого выключателя; 35 – рычаг щетки; 36 – щетка стеклоочистителя. Термобиметаллический предохранитель 11 и дополнительный резистор 10 цепи обмотки возбуждения установлены на кронштейне 13 крепление стеклоочистителя.

Вращение вала 29 электродвигателя 9 через соединительную муфту 20 передается червяку 19 и далее через соединительную муфту 20 передается червяку 19 и далее червячной шестерне 15 понижающего редуктора. На валу шестерни 15 жестко закреплен кривошип. Вращение кривошипа посредством рычажной системы преобразуется в качание рычагов 35, на которых установлены щетки 36.

Термобиметаллический предохранитель разрывает цепь электропитания электродвигателя при появлении недопустимых перегрузок, когда щетки примерзают к стеклу или по каким-либо причинам возрастает сопротивление вращению якоря электродвигателя. Включение электродвигателя после остывания биметаллической пластины предохранителя происходит автоматически. В случае неоднократного срабатывания предохранителя следует выключить стеклоочиститель, найти причину неисправности и устранить её. В качестве электродвигателей для стеклоочистителей используются электродвигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и с параллельным или смешанным электромагнитным возбуждением, в большинстве случаев, объединенные с понижающим редуктором в моторредукторе.

При вращении шестерни 15 по её контактному диску 14 скользит пружинный контакт 34 концевого выключателя, который периодически разъединяет и соединяет подвижный диск с корпусом редуктора, т.е. массой. После отключения от источника электропитания электродвигатель продолжает работать до тех пор, пока контакт 34 замкнут на вращающийся контактный диск 14. Как только пружинный контакт 34 попадает в разрыв контактного диска 14, цепь электропитания электродвигателя разрывается и механизм стеклоочистителя останавливается. В момент остановки электродвигателя щетки стеклоочистителя должны находиться в заданном положении их парковки на одной из границ зон очистки стекла. В электродвигателях с параллельным и смешанным электромагнитным возбуждением остановка якоря при

срабатывании концевого выключателя происходит с соединением щеток через обмотку возбуждения. В стеклоочистителях с электроприводом от электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов после срабатывания концевого выключателя основные щетки замыкаются накоротко, и частота вращения вала электродвигателя резко уменьшается. Электродвигатель работает в режиме динамического торможения, что и обеспечивает укладку щеток стеклоочистителя в строго заданном положении парковки.

Детали моторредуктора очистителя ветрового стекла автомобиля ВАЗ-2110 показаны на рис.4.5. Здесь обозначено: 1 – Крышка; 2 – помехоподавительный конденсатор; 3 – панель с контактами концевого выключателя; 4 – прокладка; 5 – шестерня с выходным валом моторредуктора; 6 – промежуточные шестерни; 7 – корпус редуктора; 8 – термометаллический предохранитель; 9 – помехоподавительная катушка индуктивности; 10 – якорь; 11 – корпус электродвигателя.

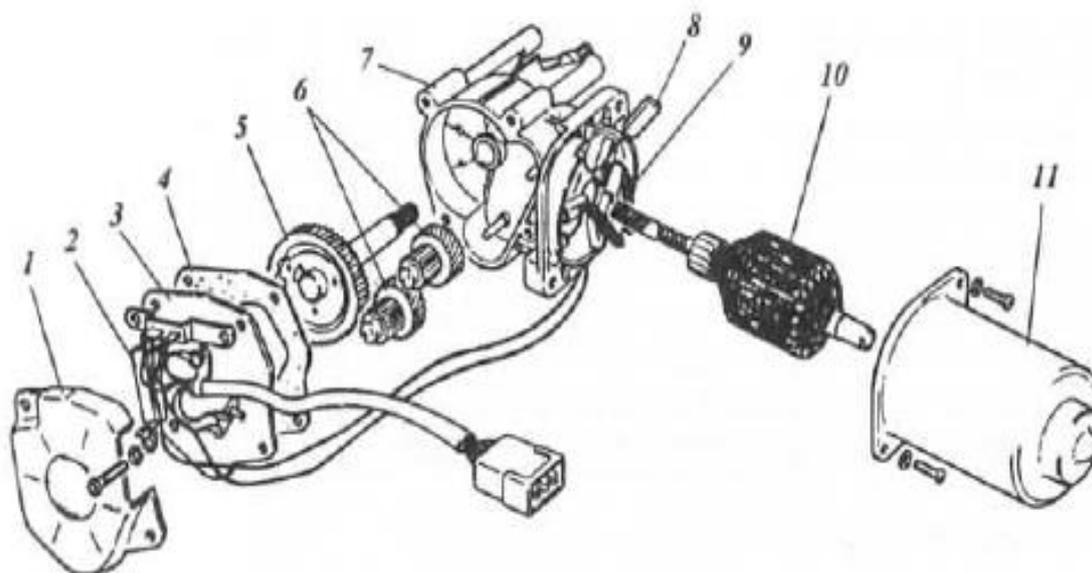


Рис. 4.5. Детали моторредуктора очистителя ветрового стекла автомобиля ВАЗ-2110

На рис. 4.6 приведены кинематические схемы кривошипных механизмов, обеспечивающих параллельное и встречное перемещение щеток стеклоочистителя ветровых стекол.

Кривошип радиусом r_1 вращается вместе с выходным валом редуктора и приводит в движение поводки радиусом r_2 , связанные рычагами

стеклоочистителя. Площадь и расположение зон очистки на стеклах зависят от взаимного расположения опор исполнительного механизма стеклоочистителя (размеры a и b) и от величины радиусов r_1 , r_2 .

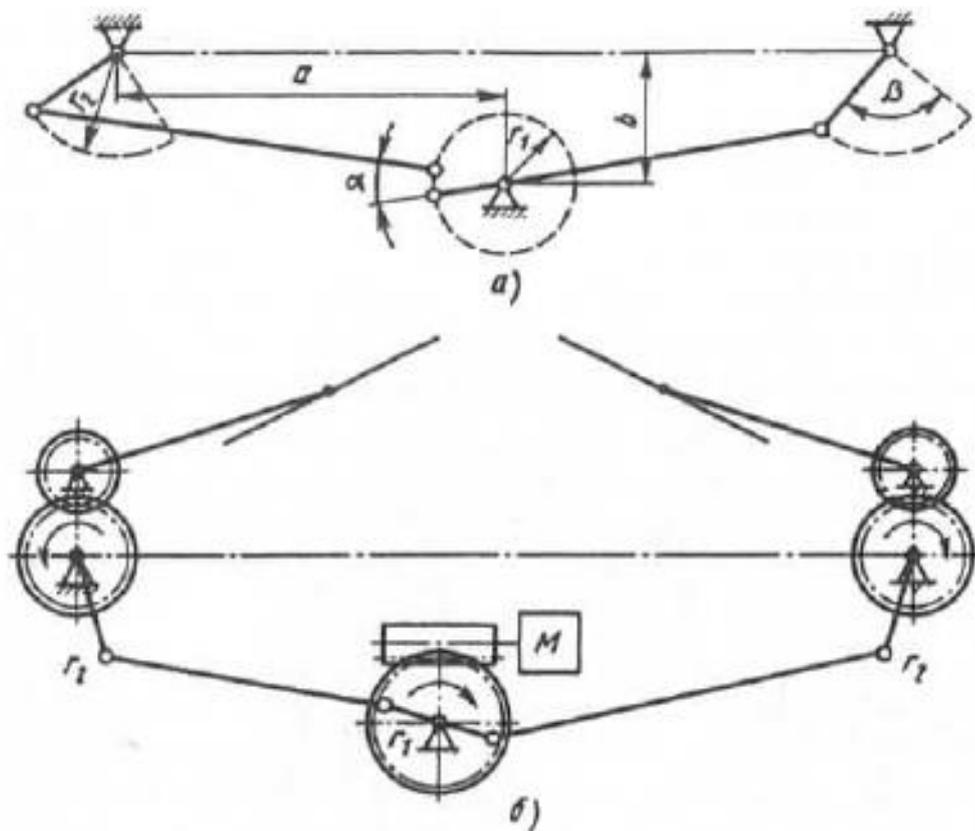


Рис. 4.6. Кинематические схемы кривошипных механизмов стеклоочистителей для обеспечения движения щеток

а – параллельного; б – встречного (α – угол между тягами).

На рис. 4.7 приведено устройство стеклоочистителя заднего стекла и стеклоочистителя с приводом на каждую щетку ветрового стекла.

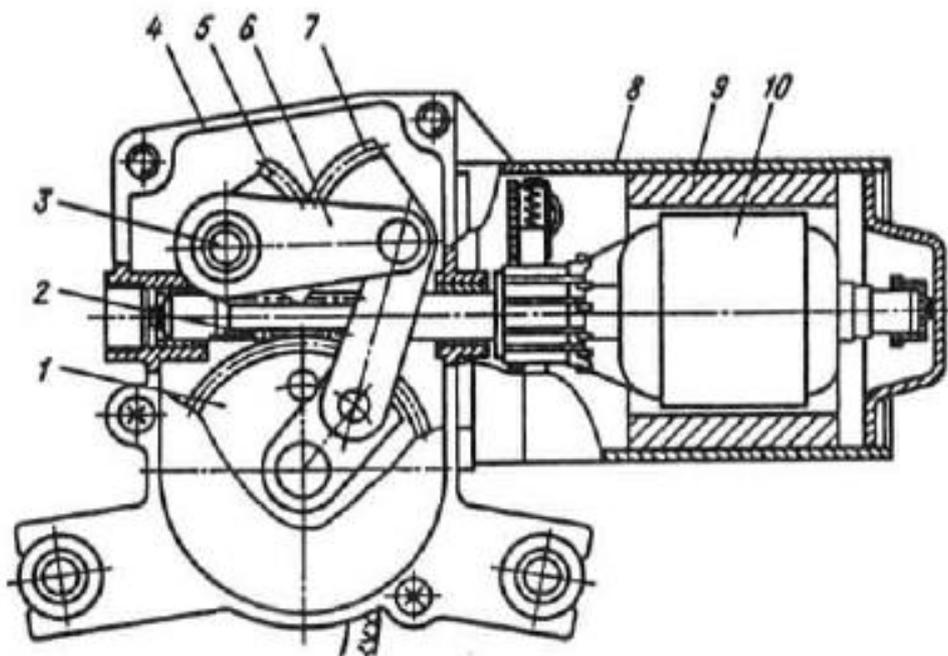


Рис. 4.7. Устройство стеклоочистителя заднего стекла и стеклоочистителя с приводом на каждую щетку ветрового стекла

В конструкцию моторредуктора входит электродвигатель с корпусом 8, постоянными магнитами 9 и якорем 10. Вал электродвигателя удлинен и заканчивается нарезкой червяка 2 редуктора. Электродвигатель не имеет крышки со стороны коллектора. Её заменяет стенка корпуса 4 редуктора. Ведомая шестерня ведомого редуктора через закрепленный на нем палец приводит в действие кривошипно-шатунный механизм, который преобразует вращательное движение ведомой шестерни червячного редуктора в колебательное движение выходного вала 3, соединенного с рычагом щетки стеклоочистителя. Кривошипно-шатунный механизм состоит из пластин с зубчатыми секторами 5 и 7 и обеспечивают угол качания щетки стеклоочистителя в пределах 130°C .

На рис. 4.8 приведено устройство очистителя стёкол фар автомобиля.

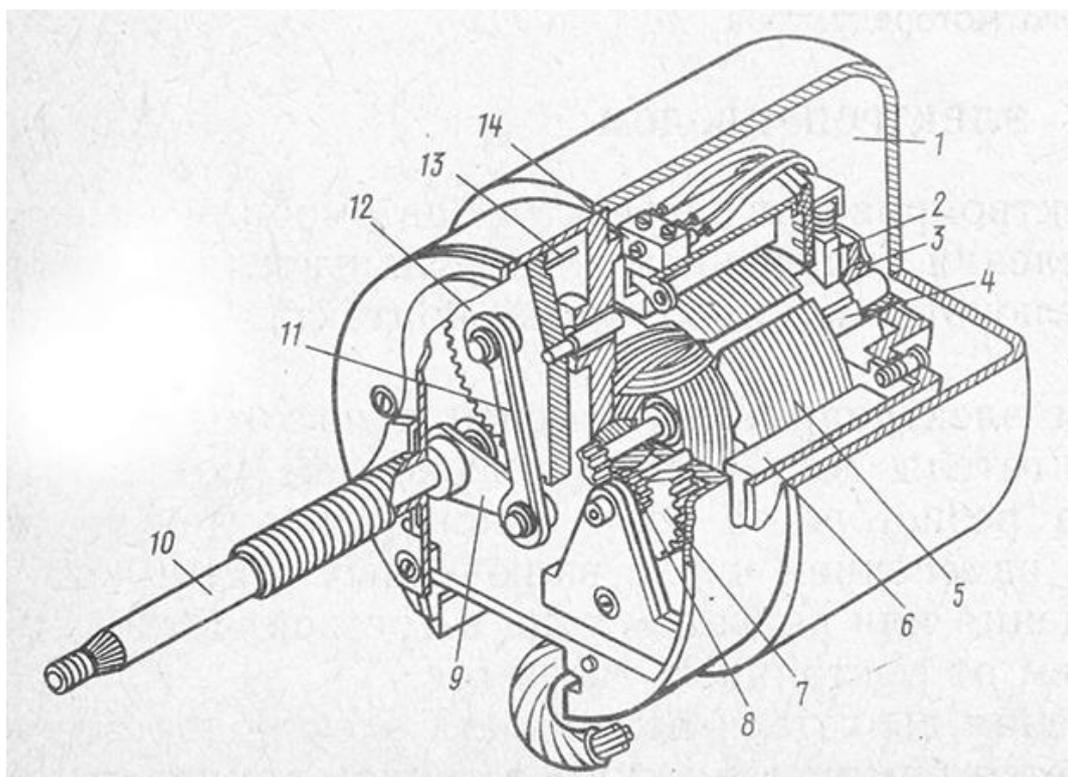


Рис. 4.8. Устройство очистителя стёкол фар автомобиля

Здесь обозначено: 1 - корпус; 2 - щетка; 3 - подшипник; 4 - коллектор; 5 - якорь; 6 - постоянный магнит; 7 - ведомое зубчатое колесо первой ступени редуктора; 8 - ведущая шестерня второй ступени редуктора; 9 - поводок; 10 - выходной вал; 11 - шатун; 12 - ведомое зубчатое колесо второй ступени редуктора; 13 - шток; 14 - выключатель. Малогабаритные моторредукторы очистителя фар не имеют червячного редуктора. Он заменен цилиндрическим многоступенчатым редуктором, выходной вал 10 которого параллелен валу двигателя. Вращательное движение зубчатого колеса редуктора преобразуется в колебания выходного вала двухэлементным кривошипным механизмом, состоящим из шатуна 11 и поводка 9. Размах колебаний выходного вала, равный 60° , необходим для очистки фар круглой формы. Для очистки фар прямоугольной формы достаточен размах колебаний до 45° , который обеспечивается одноэлементным кривошипным механизмом. В этом случае вращательное движение зубчатого колеса редуктора преобразуется в колебания выходного вала с помощью шатуна и закрепленного на торцевой поверхности колеса пальца, входящего в прорезь шатуна. Концевой выключатель разрывает цепь питания электродвигателя, когда его шток попадает в углубление зубчатого колеса. Электродвига-

тель и редуктор стеклоочистителя заключены в единый корпус. Многие типы моторредукторов не имеют встроенного кривошипного механизма. Их вал совершает вращательное движение.

4.2.2. Нагрузки на привод стеклоочистителя ветрового стекла и его моделирование

Структура механической системы большинства моторредукторов сводится к одной из двух схем (с одноступенчатым (MP1) или двухступенчатым (MP2) редукторами), приведённых на рис. 4.9.

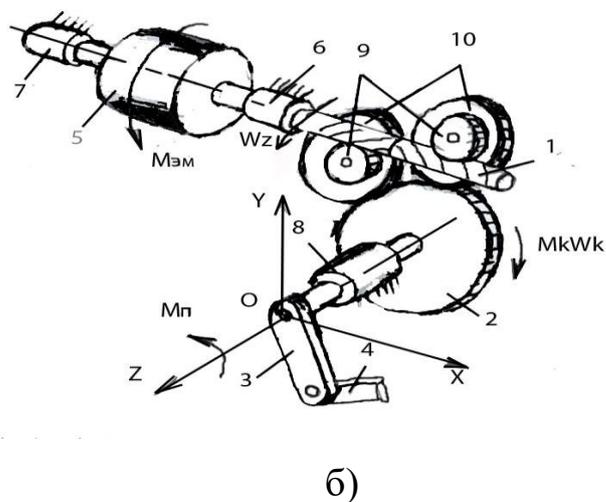
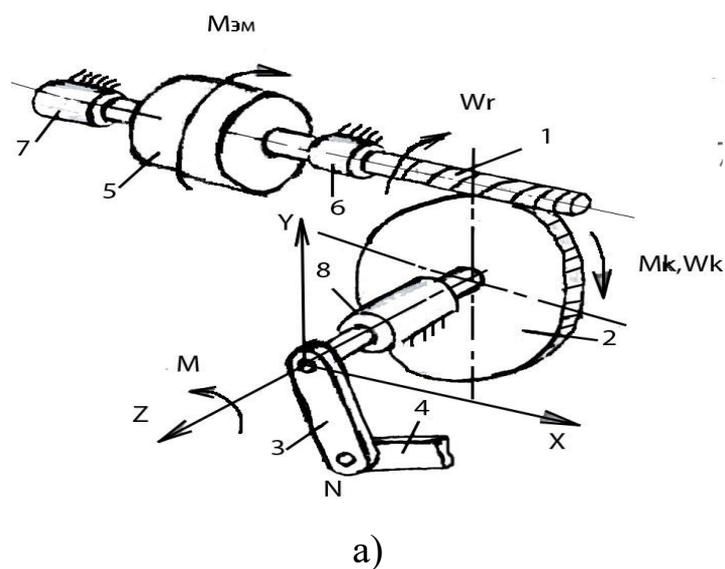


Рис. 4.9. Схемы механической системы моторредуктора MP1(а) и MP2(б)

На рис. 4.9, а и 4.9, б обозначено: 1 – червячный вал; 2 – выходное зубчатое колесо; поводок кривошипно-коромыслового механизма; 3 – поводок; 4 - тяга; 5– якорь ротора электродвигателя; 6 – передняя опора червячного вала; 7 – задняя опора червячного вала; 8 – опора зубчатого колеса; 9, 10 – зубчатые колёса в МР2.

Электромагнитный момент ротора, создаваемый в двигателе, вызывает вращение червячного вала 1 с частотой ω_r и моментом M_r , который через зубчатое колесо 2 и дополнительную зубчатую передачу 9, 10 в МР2 передаётся на поводок 3 стеклоочистителя, преодолевая момент сопротивления M_{Π} и обеспечивая частоту вращения поводка $\omega_{\Pi} = \omega_k$. Все возникающие нагрузки должны восприниматься опорами 6, 7 и 8. Одним из основных требований, предъявляемых к моторредуктору, является требование обеспечения высокого качества движения, показателями которого являются:

- плавность движения;
- отсутствие источников выделяющихся шумов и вибраций;
- минимальные электромагнитные возмущения;
- минимальные статические и динамические моменты;
- высокое быстродействие.

Движение в моторредукторе осуществляется под действием управляющего момента $M_{\text{эм}}$ при сопротивлении нагрузки в виде момента M_{Π} на поводке 3.

Рассмотрим особенности момента M_{Π} , возникающего во время работы стеклоочистителя. Свяжем с точкой крепления поводка (т. О на рис. 4.9) на валу выходного зубчатого колеса неподвижную систему координат XYZ, расположив ось X в направлении тяги. Анализ работы стеклоочистителя показывает, что на поводке возникает момент сил.

$$M_n = k \cdot M_c |\sin \alpha_n|, \quad (4.6)$$

где M_n – момент на поводке, k – коэффициент, зависящий от параметров кривошипно-коромыслового механизма, M_c – момент сил сопротивления на коромысле, α_n – угол поворота поводка вокруг оси Z. На рис. 4.10 приведён график зависимости $M_n = f(\alpha_n)$ при условии, что величины k и M_c являются близкими к постоянным. Из рассмотрения рис. 4.10 и выражения (4.6) следует, что момент на поводке является знакопостоянной, изменяющейся близко к гармоническому закону величиной.

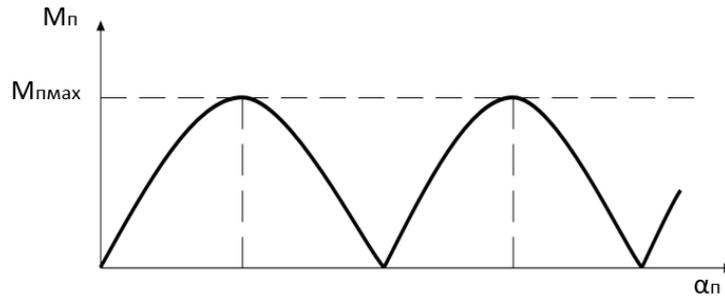


Рис. 4.10. График зависимости $M_n = f(\alpha_n)$

При постоянной частоте вращения поводка изменение M_n будет происходить периодически с круговой частотой $\omega_n = \pi T$, где T – период изменения величины M_n . Следовательно, все усилия и моменты, возникающие в кинематической цепи моторедуктора, имеют периодический (циклический) характер, что может являться источником вибраций и звуковых колебаний в его конструктивных элементах.

Рассмотрим характер изменения сил, приложенных со стороны поводка к выходному валу моторедуктора. Момент M_n связан с силой F_n , приложенной к поводку в т. N со стороны тяги, выражением

$$F_n = M_n \cdot ON^{-1}, \quad (4.7)$$

где ON – длина поводка.

Поскольку F_n является векторной величиной, то при вращении поводка её проекции на оси координат X и Y в функции α_n , исходя из выражений (4.6) и (4.7), будут иметь вид, представленный на рис. 4.11.

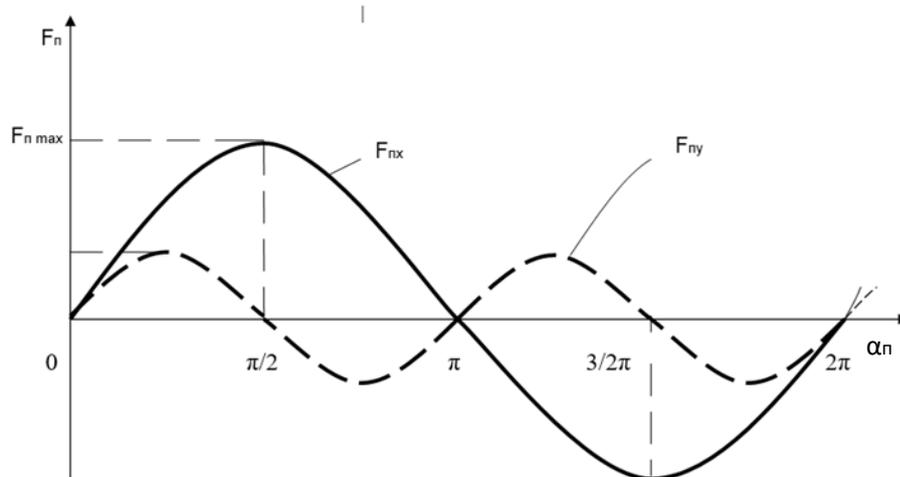


Рис. 4.11. График зависимостей F_{nx} и F_{ny} от α_n

Приведённые графические зависимости получены по выражениям

$$\begin{aligned} F_{nx} &= ON^{-1}kM_c |\sin \alpha_n| \cos \alpha_n \\ F_{ny} &= ON^{-1}kM_c \cos \alpha_n |\sin \alpha_n| \end{aligned} \quad (4.8)$$

Из рассмотрения рис. 4.11 следует, что периодически меняющийся момент M_n при вращении поводка обуславливает возникновение периодических, близких к гармоническим, усилий, действующих на выходной вал моторедуктора. При этом взаимно ортогональные составляющие этих усилий имеют различные частоты и амплитуды: составляющая, действующая вдоль направления тяги имеет приблизительно в два раза большую амплитуду и период колебаний, чем составляющая, ортогональная ей. Модуль результирующей величины F_n определяется из состояния

$$|F_n| = \sqrt{F_{nx}^2 + F_{ny}^2} . \quad (4.12)$$

В частности, для моторедуктора, работающего в номинальном режиме с параметрами $M_{n\max} = 5 \text{ Нм}$, $W_n = 2n \text{ рад с}^{-1}$ и $ON = 0,05 \text{ м}$, амплитудное значение усилий, действующих на выходной вал моторедуктора будет $F_{nx\max} = 100 \text{ Н}$ и $F_{ny\max} = 50 \text{ Н}$ при циклических частотах их изменения $f_x = 1 \text{ Гц}$ и $f_y = 2 \text{ Гц}$ соответственно. Таким образом, возникновение периодических составляющих нагрузок, обусловленных использованием кривошипных механизмов приводит к циклическим нагрузкам на детали и узлы стеклоочистителя, повышенному их износу, шуму и вибрации. Кроме этого, указанный механизм сложно компоновать в кузов автомобиля и имеет большую трудоемкость изготовления. Указанные недостатки можно устранить путем использования «прямого» привода стеклоочистителя, в котором кривошипный механизм отсутствует, и каждый рычаг стеклоочистителя устанавливается на отдельный привод.

Наиболее полное представление об изучаемом объекте дает его представление в динамике. Получим динамические модели двигателя и моторедуктора, используя для их математического описания аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений.

Особенностью червячных передач, входящих в состав моторедуктора является наличие самоторможения при ведущем червячном

колесе, которое реализует невозможность передачи движения от червячного колеса к червяку при выполнении условия:

$$-\lambda \leq \rho_{np}, \quad (4.13)$$

где λ - угол подъема винтовой линии на начальном цилиндре; ρ_{np} - приведенный угол трения в зацеплении.

Основными режимами червячных передач являются:

1) тяговый режим (прямой ход), характеризуемый отсутствием самоторможения, поскольку силовой поток направлен от вала червяка к валу колеса;

2) режим оттормаживания (обратный ход), при котором устанавливающееся движение возможно только в том случае, если оба звена передачи (червяк и червячное колесо) является ведущими.

При передаче статических и динамических усилий через НР силы сопротивления, возникающие в зацеплениях, создают моменты постоянных потерь (потери холостого хода) и моменты переменных (нагрузочных) потерь. Последние, как правило, выражаются через коэффициент полезного действия.

Уравнение динамики червячной передачи, переменные потери которой определяются через коэффициент полезного действия, могут быть записаны в следующем виде:

$$M_1(t) = J_1 \cdot \rho^2 \cdot \alpha_1(t) + |M_n| \operatorname{sign} \rho \cdot \alpha_1(t) + \beta \cdot M_3(t), \quad (4.14)$$

$$M_3(t) = (C_3 + b_3 \cdot \rho) [\alpha_1(t) / i - \alpha_2(t)] = J_2 \cdot \rho^2 \cdot \alpha_2(t) + M_2(t),$$

где: $M_1(t)$; $M_2(t)$ – моменты, приложенные к валу червяка и червячного колеса; $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$ - угловые координаты вала червяка и червячного колеса; J_1 , J_2 – момент инерции вращающихся масс; $M_n(t)$ – момент постоянных потерь в опорах и зацеплений; $M_3(t)$ – момент в зацеплении; C_3 – жесткость зубьев червячного колеса; b_3 – коэффициент потерь на упругую деформацию в зацеплении; β - динамическое передаточное отношение, учитывающее нагрузочные потери в зацеплении.

Для ортогональной червячной передачи с цилиндрическим червяком динамическое передаточное отношение без учета потерь на трении в опорах определяется выражением:

$$\beta = 1 / \eta_{n.x} \cdot i = \operatorname{tg}(\lambda + \rho_{np}) / i \cdot \operatorname{tg} \lambda, \text{ если } M_3(t) \cdot \alpha_1(t) > 0 \text{ (прямой ход)} \quad (4.15)$$

$$\beta = - | \eta_{o.x} | / i = \operatorname{tg}(\lambda - \rho_{np}) / i \cdot \operatorname{tg} \lambda, \text{ если } M_3(t) \cdot \alpha_1(t) < 0 \text{ (обратный ход),}$$

где: $\eta_{n.x}$; $\eta_{o.x}$ - коэффициент полезного действия прямого и обратного хода передачи.

Преобразуя уравнение (4.14), получаем уравнение выбега передачи в тяговом режиме без учета внутреннего демпфирования в зацеплении ($b_3 = 0$).

$$J_1 \cdot \rho^2 \cdot \alpha_1(t) + |M_n| \cdot \text{sign} \rho \cdot \alpha_1(t) + 1/\eta_{n.x.} \cdot i \cdot (M_3(t)) = 0 \quad (4.16)$$

$$M_3(t) = C_3[\alpha_1(t)/i - \alpha_2(t)] = J_2 \cdot \rho^2 \cdot \alpha_2(t)$$

Из уравнений следует, что выбег будет происходить в тяговом режиме вплоть до остановки при выполнении условия:

$$J_1 \geq J_2 / \eta_{n.x.} \cdot i_2 \cdot [1 + (2 \cdot M_n \cdot \eta_{n.x.} \cdot i / M_2)] \quad (4.17)$$

При нарушении полученного условия выбег передачи будет происходить в режиме оттормаживания с момента времени:

$$\tau = 1/k \cdot \arccos\{\eta_{n.x.} \cdot i \cdot [J_2 \cdot M_n(t) + J_2 \cdot i \cdot M_2(t)] / J_2 \cdot [i \cdot \eta_{n.x.} \cdot M_n(t) + M_2(t)]\}, \quad (4.18)$$

$$\text{где: } k = ((C_3 \cdot (J_2 + \eta_{n.x.} \cdot J_1 \cdot i^2) / J_1 \cdot J_2 \cdot \eta_{n.x.} \cdot i^2))^{1/2}.$$

Момент в зацеплении при этом не изменяет своего знака, если выполняется условие отсутствия динамического заклинивания:

$$J_1 \cdot i^2 > |\eta_{o.x.}| \cdot J_2 \quad (4.19)$$

При невыполнении этого условия момент в зацеплении нарастает по апериодическому закону вплоть до остановки передачи:

$$M_3(t) = (((J_2 \cdot M_n(t) - J_1 \cdot i \cdot M_2(t)) / (|\eta_{o.x.}| \cdot J_p \cdot J_1 \cdot i^2)) \cdot i \times \quad (4.20)$$

$$\times (\text{chrt}_2 - 1))) + M_3(t) / 2 \cdot \text{shrt}_2$$

$$\text{где: } r = ((C_3 \cdot |\eta_{o.x.}| \cdot J_n - J_1 \cdot i^2) / J_1 \cdot J_n \cdot i^2)^{1/2}, \quad t_2 = t - \tau$$

Из уравнений (4.14) и (4.15) следует, что червячная самотормозящаяся передача может быть представлена в виде системы с переменной структурой, где логические условия, изменяющие значения и знак коэффициента в управлении моментов на валу червяка, реализуются с помощью управляющего устройства (УУ), которое состоит из ключевого элемента (КЭ), блока изменения структуры (БИС) и сумматора.

На основе информации о знаках момента в зацеплении и скорость вала червяка блок изменения структуры дает команду на переключение КЭ, изменяющего значение и знак коэффициента связи по моменту. При этом в зависимости от режима работы передачи выходная величина управляющего устройства будет равна:

$$M_3(t) \cdot 1/\eta_{g/v} \cdot i \quad \text{либо} \quad -M_2(t) \cdot |\eta_{o.x.}|/i.$$

Это обеспечивает статическую и динамическую необратимость в структурной схеме передачи. Ключевой элемент в силу разрывности его характеристики (динамического передаточного отношения), является существенно нелинейным звеном.

Аналитический метод решения позволяет найти общее, частное (при фиксированных начальных условиях) и периодическое решение системы уравнений вида (4.14). Однако ввиду трудности аналитического решения подобных уравнений, а также невозможности исследования в реальных самотормозящихся передачах, так называемого режима заклинивания, возникает необходимость их исследования с помощью ЭВМ. При рассмотрении самотормозящихся передач как элементов системы автоматического регулирования можно с достаточной для практики точностью представлять их в виде звеньев с абсолютно жесткими кинематическими связями.

При этом уравнение моментов на выходном валу любого типа (червячного, планетарного) может быть представлена в следующем виде:

$$M_1(t) = J_1 \cdot \alpha_1''(t) + |M_n| \cdot \text{sign } p \alpha_1(t) + \beta \cdot |M_2|(t) + J_2 \cdot \alpha_2''(t), \quad (4.21)$$

где:

$$\begin{cases} \beta = \frac{1}{\eta_{n.x.}} \cdot i, \text{ если } M_1(t) \cdot [M_2(t) + J_2 \cdot \alpha_2''(t)] < 0; \\ \beta = -|\eta_{o.x.}| / i, \text{ если } M_1(t) [M_2(t) + J_2 \cdot \alpha_2''(t)] < 0. \end{cases} \quad (4.22)$$

Таким образом, уравнение движение моторредуктора без учета процессов в двигателе будет описываться уравнениями:

$$\begin{aligned} M_o(t) &= M_1(t) + M_n(t) + J_1 \cdot i \cdot p^2 \cdot \alpha_1; \\ M_1(t) &= \beta |M_2|(t) + J_2 \cdot p^2 \cdot \alpha(t); \\ M_n(t) &= M_n \cdot \text{sgn} \cdot \omega_o(t). \end{aligned} \quad (4.23)$$

Модель двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов с достаточной степенью точности представляется уравнением:

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + C_e \omega_d, \quad (4.24)$$

где L – индуктивность обмотки якоря.

Базовые значения моделируемой машины: $M_c = 8 \text{ Нм}$, $R = 1,65 \text{ Ом}$, $C_e = 0,125 \text{ в} \cdot \text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$, $U = 12 \text{ В}$, $J = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ кгм}^2$, $L = 1,619 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$.

Достаточно хорошие результаты при моделировании технических систем достигаются с помощью пакета Matlab. Библиотека Simulink, входящий в состав Matlab, позволяет достаточно оперативно составлять исследуемые модели, изменять их структуру и регистрировать результаты моделирования, не прибегая к сложным программным процедурам. На рис. 4.12 приведена компьютерная модель моторедуктора в пакете визуального моделирования Simulink без учета нагрузки, построенная по уравнениям (4.21- 4.24).

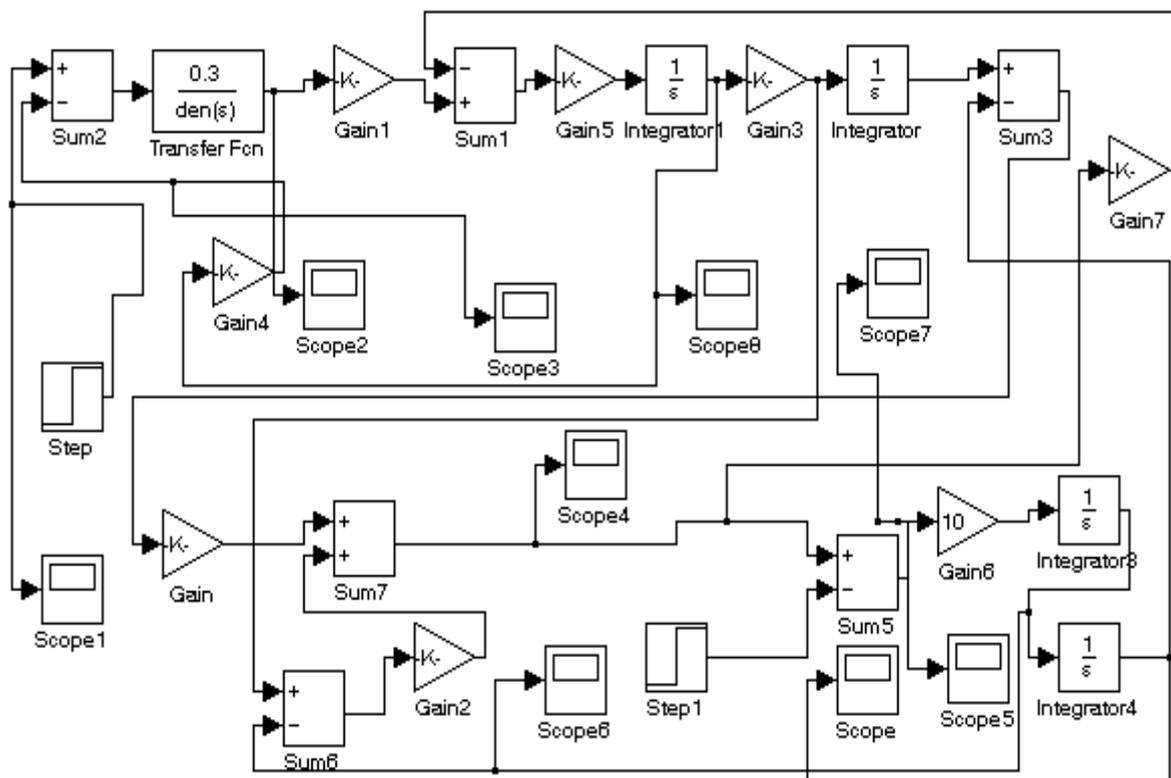


Рис. 4.12. Схема модели моторедуктора в пакете визуального моделирования Simulink без учета нагрузки

На рис. 4.13 приведена компьютерная модель моторедуктора в пакете визуального моделирования Simulink с учетом нагрузки.

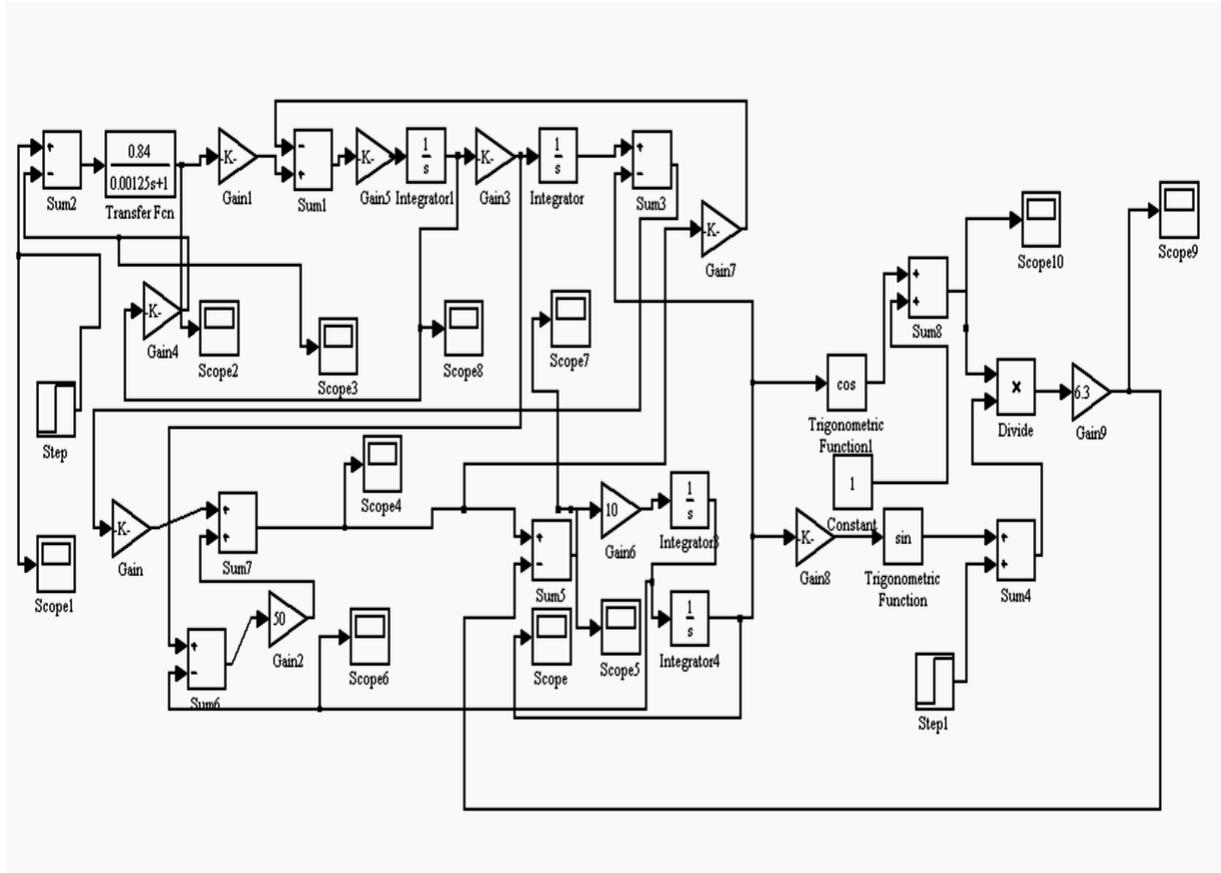


Рис. 4.13. Компьютерная модель моторредуктора с нагрузкой

На рис. 4.14 - 4.19 приведены результаты моделирования работы моторредуктора по модели, приведенной на рис. 4.12. На вход модели подавался сигнал, эквивалентный входному напряжению 12 В (рис. 4.14).

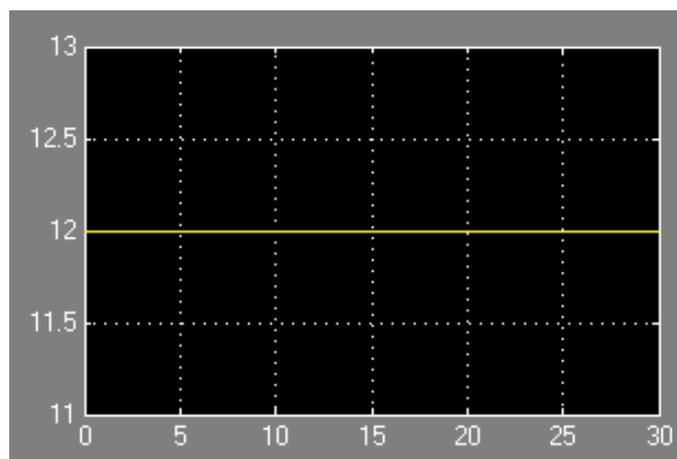


Рис. 4.14. Входное напряжение

На рис. 4.15 приведен график изменения тока в якоре двигателя.

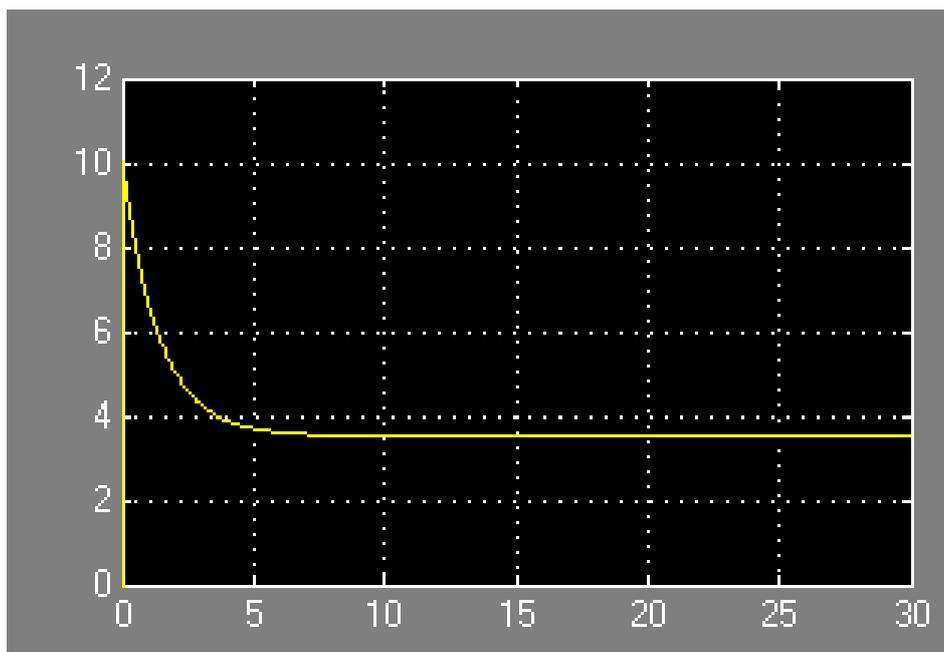


Рис. 4.15. Ток в якоре двигателя

На рис. 4.16 приведен график изменения скорости двигателя.

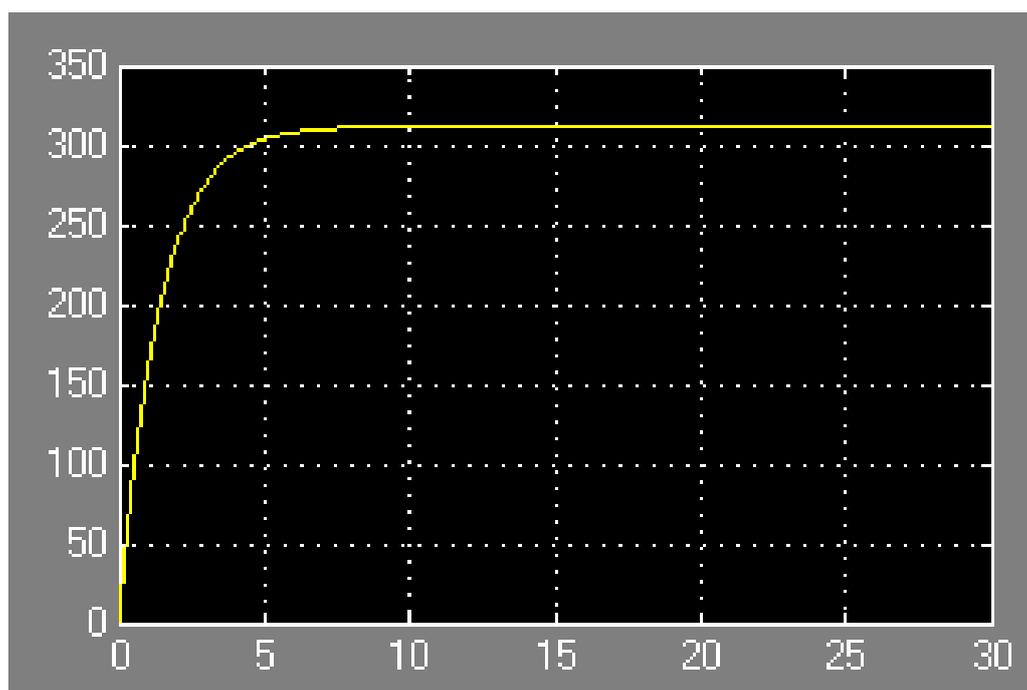


Рис. 4.16. Скорость двигателя

На рис. 4.17 приведен график изменения скорости на выходном валу моторредуктора.

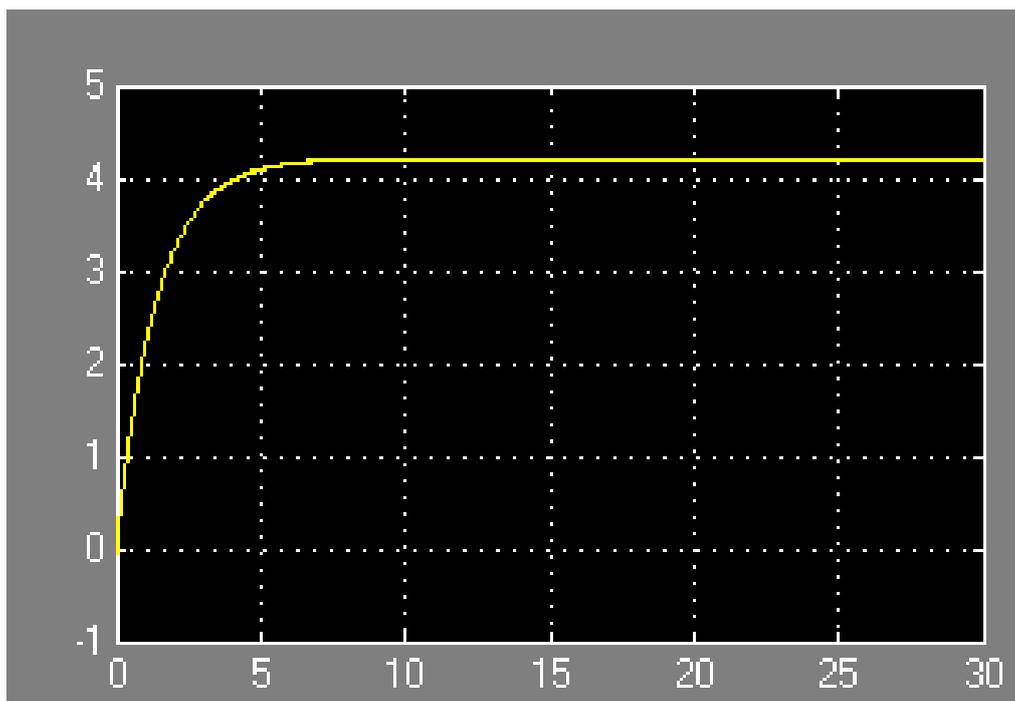


Рис. 4.17. Скорость на выходном валу моторредуктора

На рис. 4.18 приведен график изменения момента на выходном валу

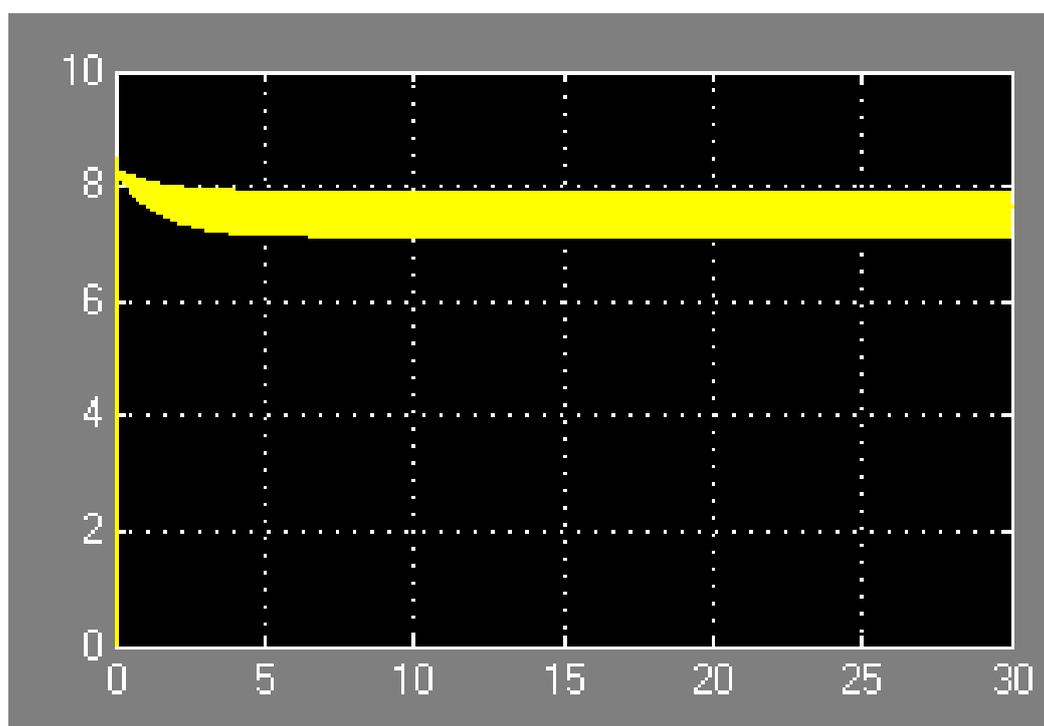


Рис. 4.18. Момент на выходном валу

На рис. 4.19 приведен график изменения угла выходного вала.

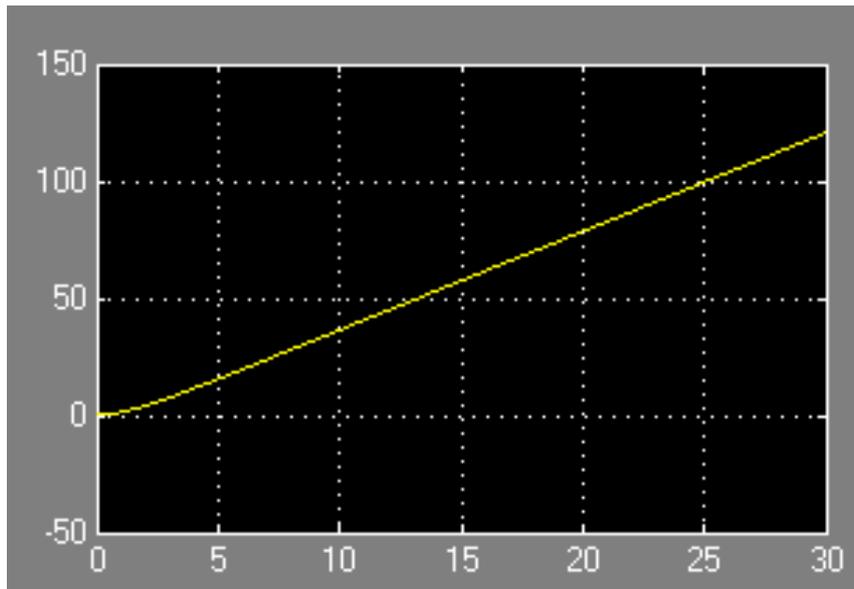


Рис. 4.19. Изменение угла выходного вала

На рис. 4.20 – 4.24 приведены результаты моделирования работы моторредуктора по модели, приведенной на рис. 4.13 с учетом нагрузки, создаваемой механизмом стеклоочистителя. На рис. 4.20 приведен график изменения тока якоря двигателя.

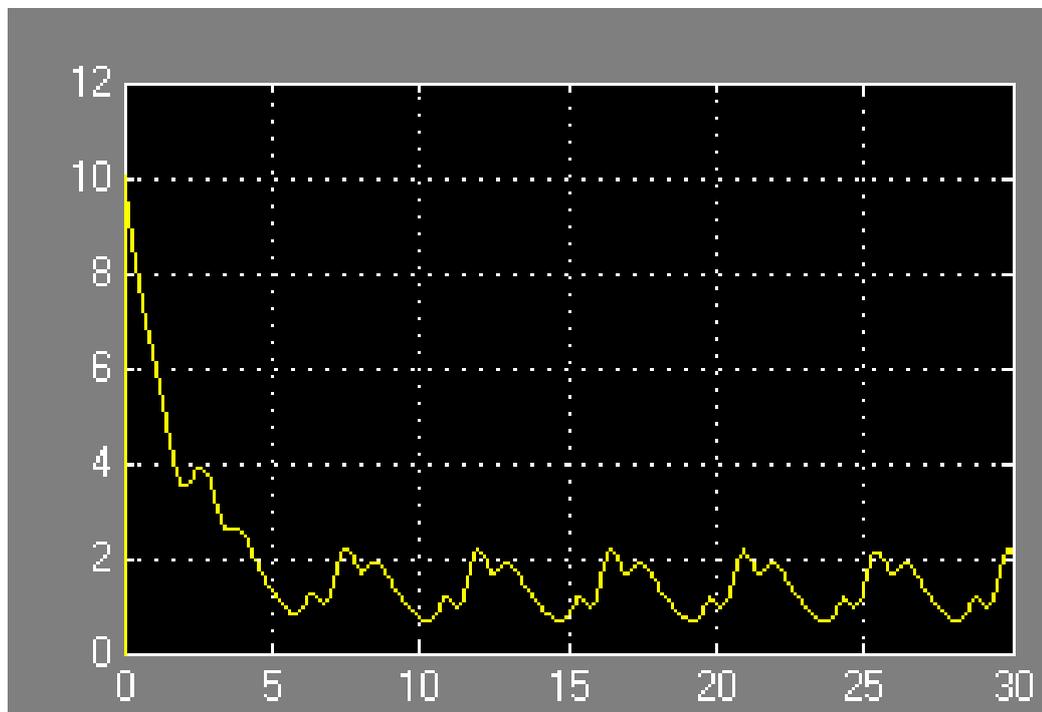


Рис. 4.20. Ток в якоре двигателя

На рис. 4.21 приведен график изменения скорости двигателя.

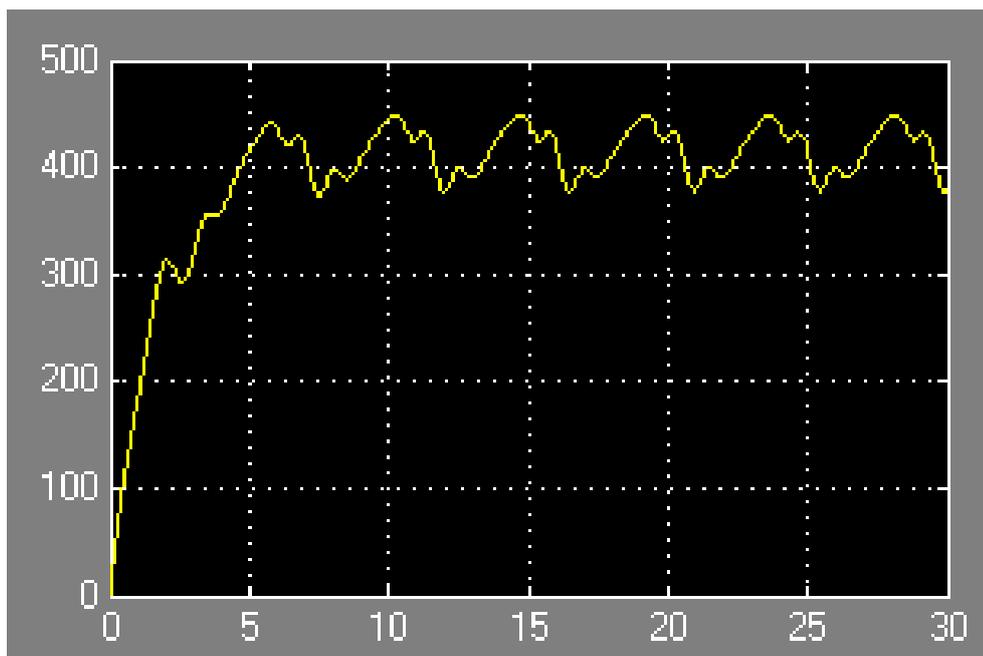


Рис. 4.21. Скорость двигателя

На рис. 4.22 приведен график изменения скорости на выходном валу моторредуктора.

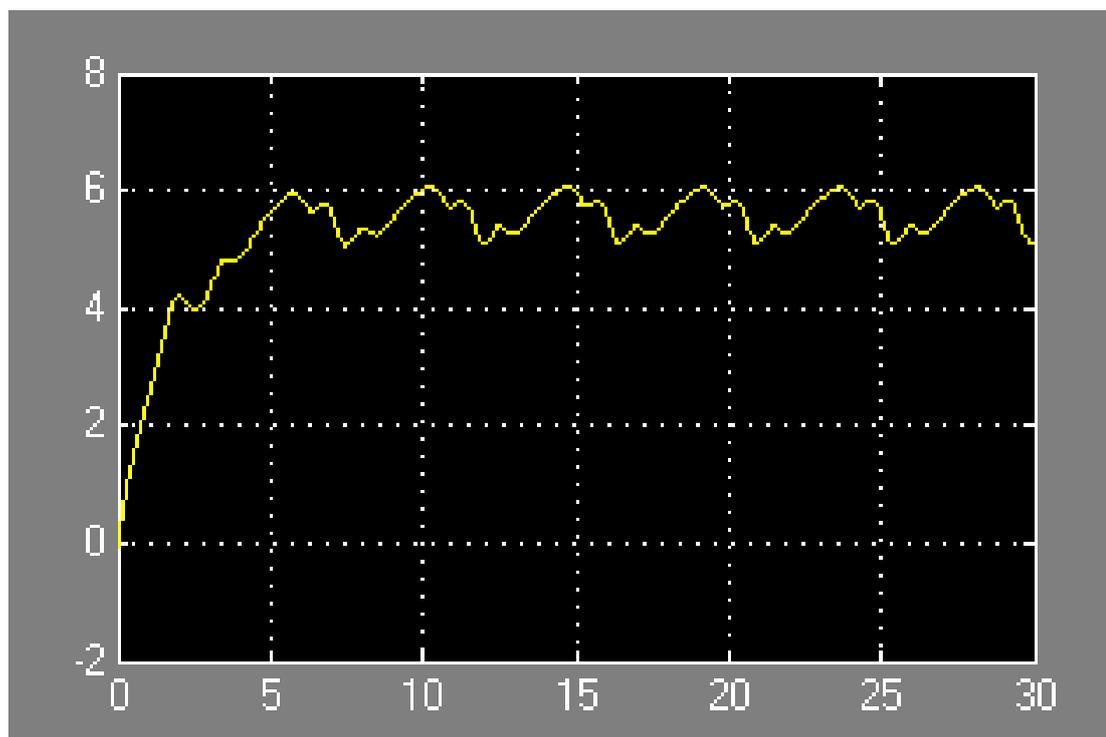


Рис. 4.22. Скорость на выходном валу моторредуктора

На рис. 4.23 приведен график изменения момента на выходном валу.

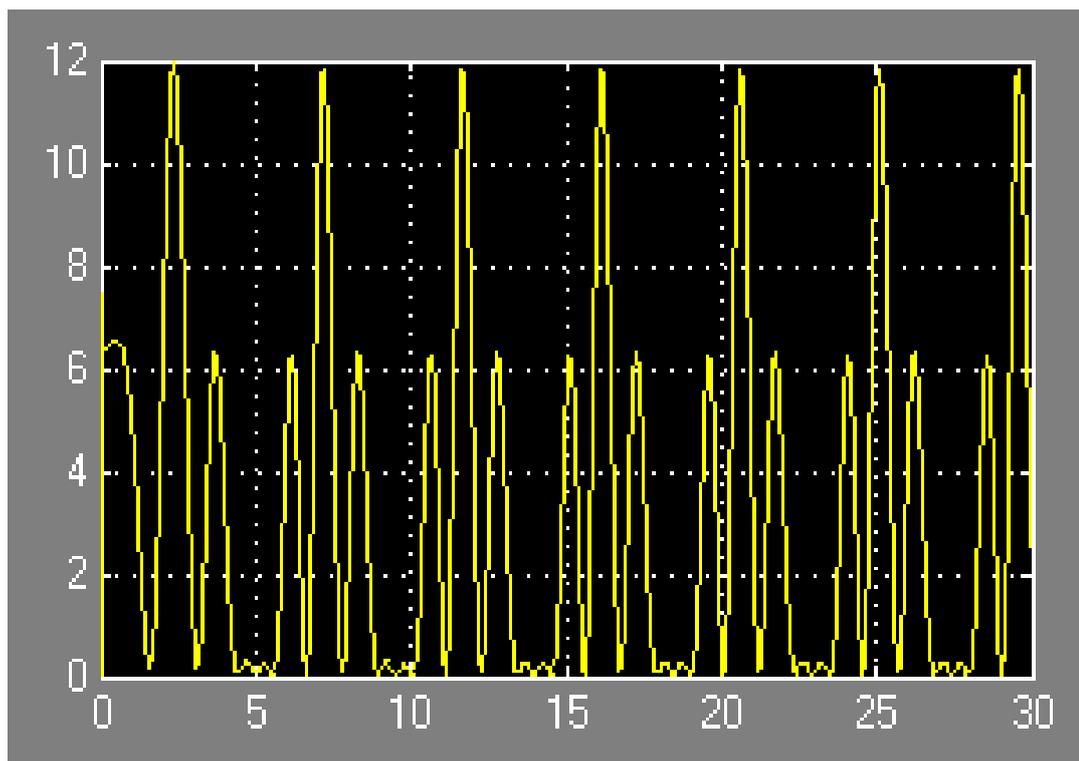


Рис.4.23. Момент на выходном валу

На рис. 4.24 приведен график изменения момента нагрузки.

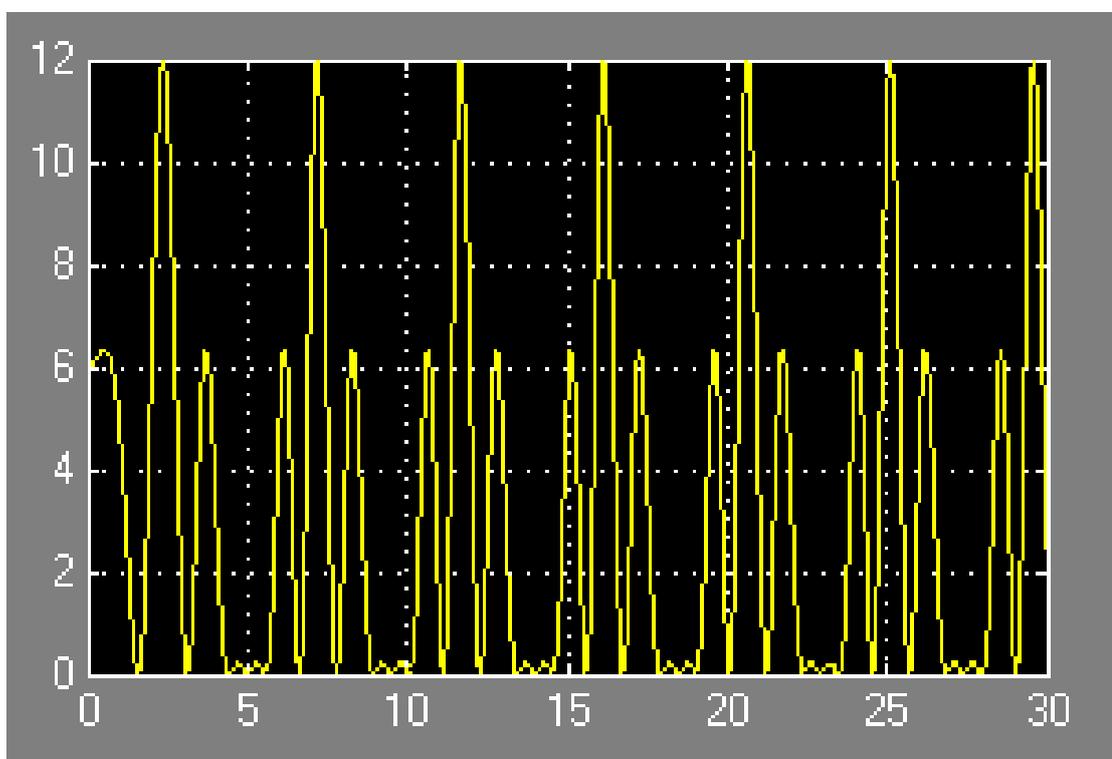


Рис. 4.24. Изменение момента нагрузки

4.3. Привод электроусилителя руля автомобиля

Усилители рулевого управления, в случае с легковыми автомобилями, повышают комфортабельность вождения, на грузовиках же без них и вовсе не обойтись, поскольку управлять авто без такого оборудования очень затруднительно. Основная задача электроусилителя – создание дополнительного усилия на рулевом механизме для облегчения управления авто. Причем работа усилителя не должна влиять на «обратную связь», чтобы водитель постоянно «чувствовал» дорогу. Электроусилитель состоит из привода, блока управления и датчиков. Привод создает усилие, обеспечивая облегчение управления автомобилем. Состоит он из электродвигателя и силовой передачи. В приводе усилителя используется несколько типов силовых передач: червячные, шестеренчатые или шарико-винтовые. Конструктивно привод электроусилителя выполняется по нескольким схемам. На рис. 4.25 приведена так называемая «двухвальная» схема, в которой вал рулевого управления и выходной вал привода электроусилителя выходными шестернями автономно связаны с зубчатой рулевой рейкой.

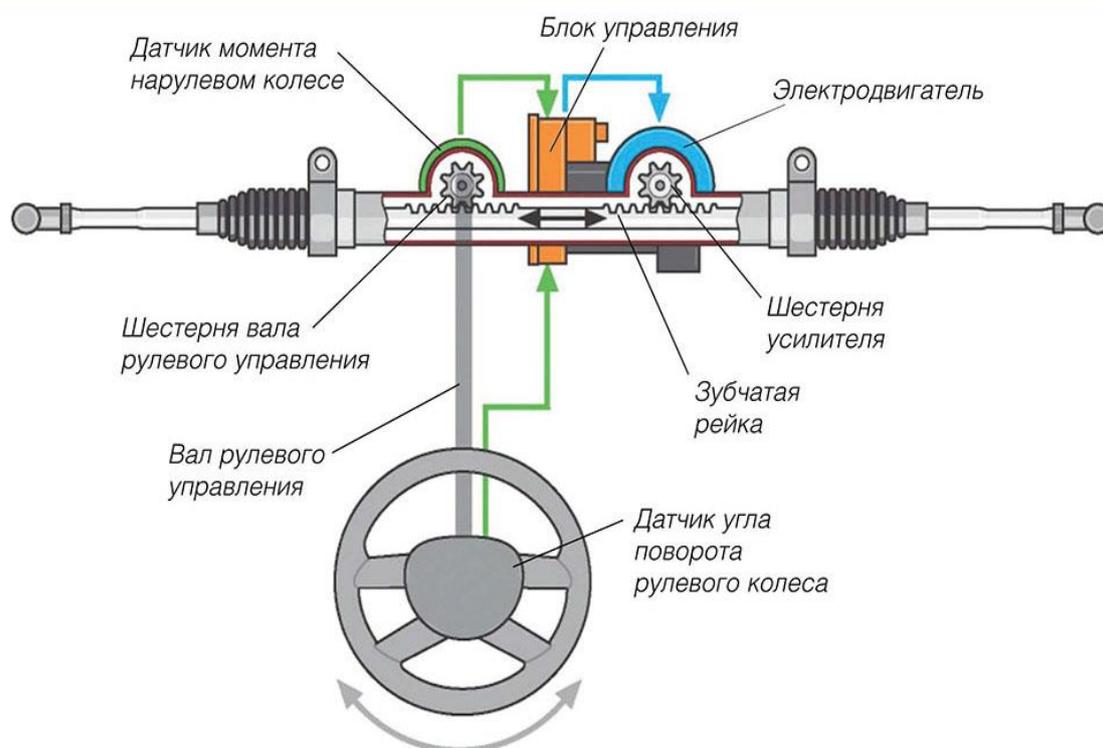


Рис. 4.25. «Двухвальная» схема привода электроусилителя

Наиболее распространенной является схема привода, в котором используется червячная передача, размещенная на рулевом валу (рис. 4.26). При этом червяк соединен с валом электродвигателя, а червячная шестерня установлена на рулевом валу. Вариантом схемы является расположение червячной передачи на рулевой рейке с использованием дополнительной шестерни.



Рис. 4.26. Схема привод с червячной передачей на рулевом валу

На рис. 4.27 приведена схема привода, в котором применяется шарико-винтовая передача.

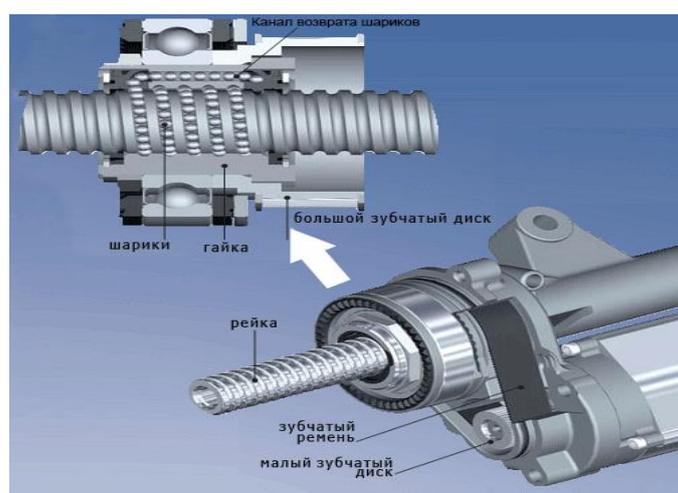


Рис. 4.27. Схема привода электроусилителя с применением шарико-винтовой передачи

В качестве двигателя в приводе электроусилителя автомобилей используются как классические коллекторные двигатели постоянного тока, описанные в предыдущем разделе, так и специальные синхронные двигатели постоянного и переменного тока описание которых приведено в разделе 6. Принцип работы привода электроусилителя руля этого типа сводится к тому, что усилие, создаваемое электродвигателем, передается на гайку, установленную на рейку (посредством ременной передачи) или же напрямую, когда электромотор встроен в рулевую рейку. В результате гайка начинает вращаться, при этом она из-за конструкции корпуса не может смещаться в продольном направлении. Поэтому вращение гайки приводит к перемещению самой рейки, тем самым и создается дополнительное усилие на рулевом механизме. В электроусилителе используется несколько датчиков, информация с которых поступает в блок управления. Основным среди них является датчик крутящего момента (его ещё называют датчик усилия), определяющего, какое усилие на руль приложил водитель. Также в конструкции используется датчик угла поворота руля. Опционально также используется информация о скорости движения автомобиля и оборотах двигателя. На рис. 4.28 приведена функциональная схема электроусилителя руля. Электромеханический усилитель рулевого управления работает следующим образом. При повороте рулевого колеса водителем возникает момент на входном валу, происходит рассогласование между входным и выходным валами. Расположенный между ними упругий элемент торсион скручивается на угол, пропорциональный величине момента. Величина этого угла определяется датчиком момента. Этот угол является заданием на систему управления двигателем. При превышении момента на входном валу заданного минимального момента блок управления электродвигателем вырабатывает силовой управляющий сигнал, приложенный к обмоткам электродвигателя, для создания на рулевом механизме требуемого компенсирующего момента. При этом величина сигнала на обмотке формируется с учетом сигналов датчика положения ротора и датчика момента на руле.

В блок управления поступают сигналы от датчика скорости и датчика числа оборотов коленчатого вала. Компенсирующий момент, реализуемый усилителем нелинейно зависит от скорости автомобиля (рис. 4.29).

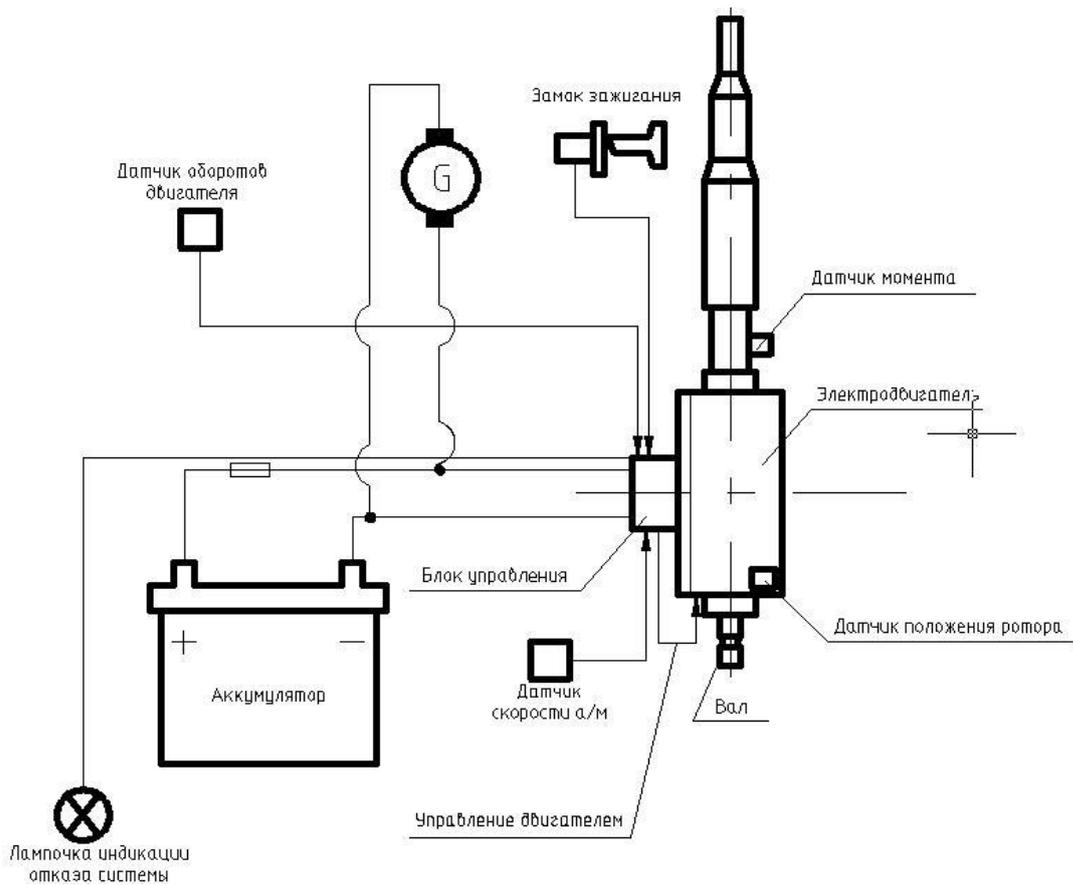


Рис. 4.28. Функциональная схема электроусилителя руля автомобиля

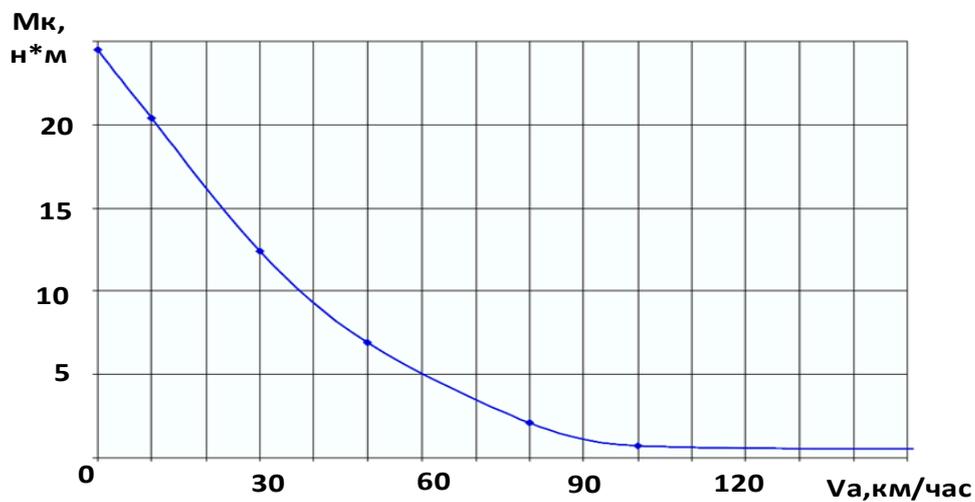


Рис. 4.29. Зависимость компенсирующего момента M_k от скорости движения автомобиля

Электроусилитель руля обеспечивает работу рулевого управления автомобиля в следующих режимах: поворот автомобиля; поворот автомобиля на малой скорости; поворот автомобиля на большой скорости; активный возврат колес в среднее положение; поддержание среднего

положения колес. Поворот автомобиля осуществляется поворотом рулевого колеса. Крутящий момент от рулевого колеса передается через торсион на рулевой механизм. Закрутка торсиона измеряется датчиком крутящего момента, угол поворота рулевого колеса – датчиком угла поворота рулевого колеса. Информация от датчиков, а также информация о скорости автомобиля, частоте вращения коленчатого вала двигателя, передаются в электронный блок управления. Блок управления рассчитывает необходимую величину крутящего момента электродвигателя усилителя и путем изменения величины силы тока обеспечивает ее на электродвигателе. Крутящий момент от электродвигателя передается на рейку рулевого механизма и далее, через рулевые тяги, на ведущие колеса. Таким образом, поворот колес автомобиля осуществляется за счет объединения усилий, передаваемых от рулевого колеса и электродвигателя усилителя. Поворот автомобиля на небольшой скорости обычно производится при парковке. Он характеризуется большими углами поворота рулевого колеса. Электронная система управления обеспечивает в данном случае максимальный крутящий момент электродвигателя (так называемый «легкий руль»). При повороте на высокой скорости, напротив электронная система управления обеспечивает наименьший крутящий момент (так называемый «тяжелый руль»). Система управления может увеличивать реактивное усилие, возникающее при повороте колес. Происходит активный возврат колес в среднее положение.

4.4. Электропривод стеклоподъемника автомобиля

Существует три основных типа стеклоподъемников: реечный, тросовый и рычажный.

Основным типом двигателя, используемого в приводах стеклоподъемников является классический коллекторный двигатель с питанием сетевым напряжением. Вид стеклоподъемника реечного типа приведен на рис. 4.30. Реечные стеклоподъемники считаются одними из самых надежных по сравнению с остальными. Работают стеклоподъемники реечного типа по принципу передачи вращательного движения от электродвигателя на шестерни, с последующим его превращением в линейное движение реек, которые выполняют подъем. Кроме надежности стеклоподъемники этого типа выполняют подъем стекол намного быстрее и тише, чем тросовые аналоги. Главный недостаток реечных стеклоподъемников состоит в том, что шестерни нуждаются в

смазке, без нее они очень скоро начинают стираться, а сами электро-стеклоподъемники перестают нормально функционировать.

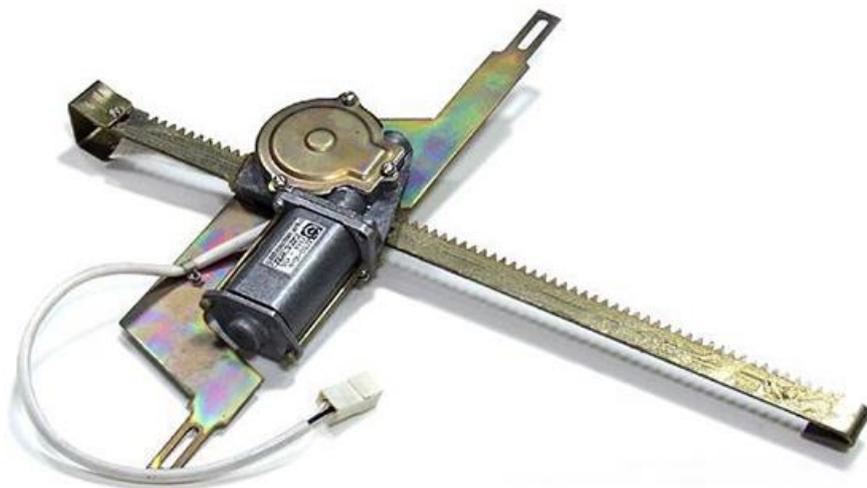


Рис. 4.30. Вид стеклоподъемника реечного типа

Кроме прочего, реечный механизм более громоздкий, поэтому устанавливают их преимущественно в "больших" автомобильных дверях.

Вид стеклоподъёмника тросового типа представлен на рис.4.31. Главным преимуществом тросовых стеклоподъемников является их высокая ремонтпригодность. В случае неисправности вы без труда сможете починить механизм, а запчасти можно найти почти в любом автомагазине. Это преимущество, на первый взгляд, несущественное, однако, как показывает практика, большинство автомобилистов выбирают этот тип ЭСП не обращая внимание на недостатки тросового механизма.



Рис. 4.31. Вид стеклоподъёмника тросового типа

Дело в том, что трос со временем изнашивается или вытягивается, кроме того из-за невысокой прочности пластиковых направляющих они часто выходят из строя, а электродвигатель очень склонен к перегреву. Вид стеклоподъемника рычажного типа приведен на рис. 4.32.

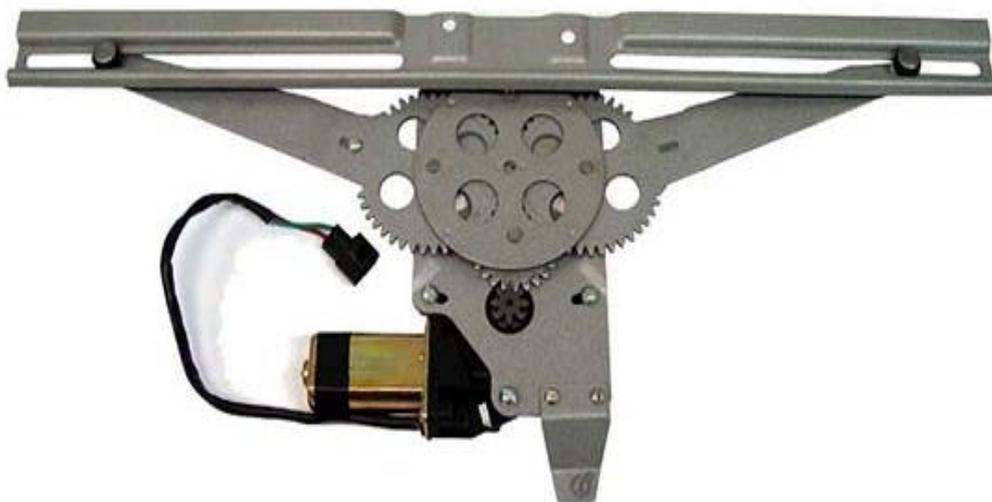


Рис. 4.32. Вид стеклоподъемника рычажного типа

Стеклоподъемник рычажного типа удачно сочетает в себе компактные размеры и высокую степень надежности. В таких электростеклоподъемниках двигатель вращает шестерню, которая выполняет передачу вращения одному или нескольким рычагам. В свою очередь рычаги перемещают пластину, на которой установлено стекло. Главным недостатком этого механизма является неравномерная скорость движения стекла, чем оно выше, тем медленнее будет происходить поднятие. Что касается стекла, то оно в независимости от типа механизма двигается по направляющим желобам или специальным рельсам. Кроме типа подъемного механизма стеклоподъемники разделяют на импульсные и не импульсные. Первые способны работать в импульсном, а также в обычном режиме. Под "обычным" подразумевается, работа электростеклоподъемника исключительно при непосредственном нажатии и удержании пальца на клавише управления. Под понятием "импульсный" имеется ввиду кратковременное прикосновение, после которого стекло само полностью опустится или поднимется. Импульсные стеклоподъемники чаще всего оснащены пятипозиционными клавишами управления, рычажок установлен в нейтральном режиме, от которого идет две скорости подъема вверх и вниз. Перемещая ползунок на одну позицию вверх, стеклоподъемник будет работать в "обычном" режиме, а стекло поднимется ровно настолько сколько по времени вы

будете удерживать руку на клавише. Вторая позиция позволит полностью поднять или полностью опустить стекло. Функция автоматического открывания и закрывания окон основана на продолжительности нажатия переключателя. Кратковременное нажатие на переключатель инициирует подъем (опускание) стекла, продолжительное нажатие – автоматическое закрывание (открывание) окна. Для обеспечения безопасности при перевозке детей предусмотрена блокировка электростеклоподъемников задних дверей с водительского места. В программе электростеклоподъемников заложена возможность работы после останова двигателя и выключения зажигания, что позволяет закрывать окна, не запуская двигатель повторно. Продолжительность работоспособного состояния стеклоподъемников после останова двигателя может колебаться в зависимости от конструкции от нескольких секунд до нескольких минут. Важной функцией, с точки зрения безопасности, является реверсирование движения стекла при встрече препятствия на подъеме. Данная функция реализуется путем контроля скорости вращения приводного механизма. Как только скорость механизма уменьшается (датчики Холла подают сигналы большей продолжительности), электронный блок управления меняет направление вращения электродвигателя на противоположное, а стекло начинает двигаться вниз. Достаточно редко применяется функция внешнего управления стеклоподъемниками, которое производится поворотом ключа зажигания, вставленного в замок двери. На некоторых моделях автомобилей предусмотрена возможность закрывания окон с помощью центрального замка с дистанционным управлением. Для автомобилей-купе, оборудованных безрамными окнами, предусмотрена функция автоматического опускания стекла на несколько миллиметров, чем достигается беспрепятственное открывание двери. На рис. 4.33 приведена схема включения электростеклоподъемников передних дверей автомобиля.

Здесь обозначено: 1 - монтажный блок предохранителей в салоне; 2 - монтажный блок реле и предохранителей в моторном отсеке; 3 - реле стеклоподъемников; 4 - выключатель стеклоподъемников на левой передней двери; 5 - выключатель стеклоподъемника правой передней двери; 6 - электродвигатель стеклоподъемника левой передней двери; 7 - электродвигатель стеклоподъемника правой передней двери.

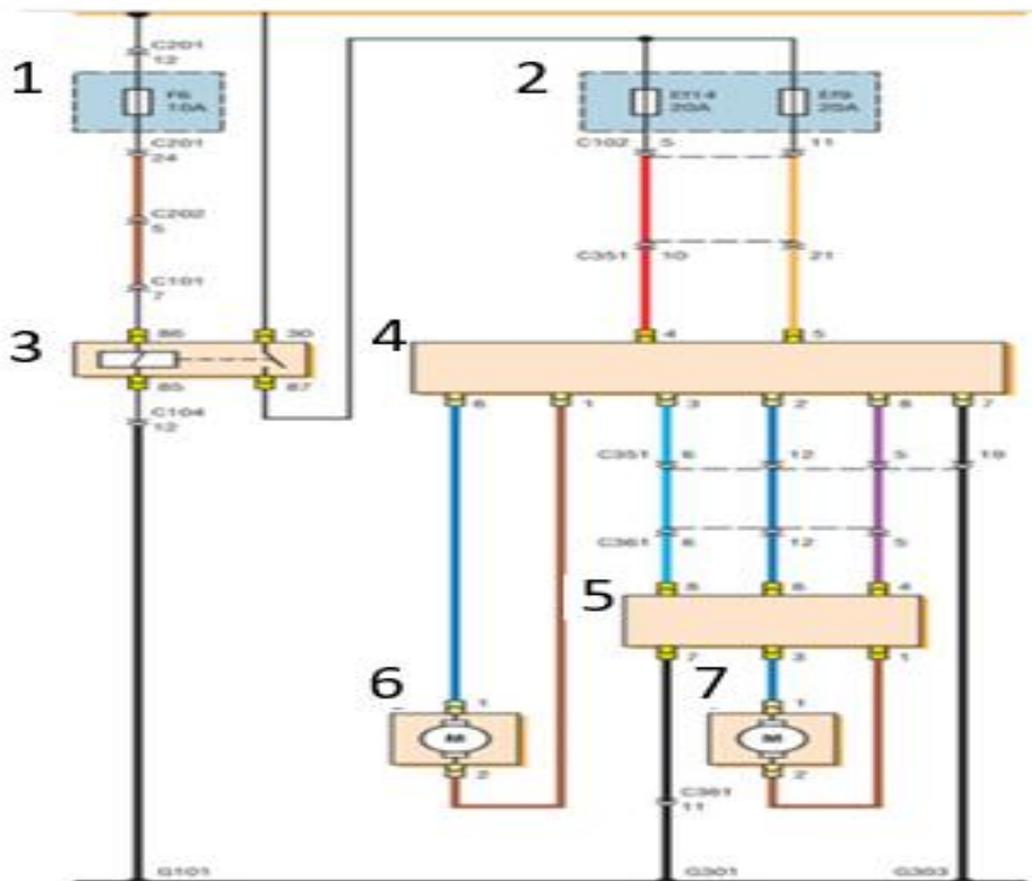


Рис. 4.33. Схема включения электростеклоподъемников передних дверей автомобиля

Вопросы для самопроверки к главе 4:

1. Перечислите основные конструктивные компоненты стартера
2. Для чего в стартере используется редуктор?
3. Сравните редукторный и безредукторный варианты построения привода стартера.
4. Назовите основные этапы работы стартера.
5. Почему в приводе стартера целесообразно использовать двигатель последовательного возбуждения?
6. Что называется режимом холостого хода стартера?
7. Какие потери мощности имеют место в стартере автомобиля?
8. Какие преимущества имеет использование электропривода в стеклоочистителе?
9. Почему в приводе стеклоочистителя используется червячный редуктор?
10. Для чего в стеклоочистителе используется кривошипно-кулисный механизм?

11. С какой целью применяется моделирование работы приводов?
12. Для чего используется электроусилитель руля автомобиля?
13. Для чего в электроусилителе руля используется торсион?
14. Что представляет собой торсион?
15. Как определяется требуемый компенсирующий момент в электроусилителе руля?
16. Какие механизмы используются в электроусилителе?
17. Какие датчики используются в электроусилителе?
18. Назовите виды механизмов в стеклоподъемниках.
19. Какие двигатели используются в приводах стеклоподъемников и почему?
20. Можно ли в стеклоподъемнике применять двигатели переменного тока?

Глава 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Общие сведения о машинах переменного тока и их устройство

Прежде, чем приступить к изложению материала раздела отметим важные положения, относящиеся к машинам переменного тока:

- 1. Преобразование энергии в электрических машинах переменного тока осуществляется (для машин вращательного движения) вращающимися полями статора и ротора, которые в установившемся режиме (вращении вала ротора с постоянной частотой) вращаются с одинаковой частотой (сцеплены между собой). При этом ротор машины может вращаться с той же частотой, что и поле, то есть синхронно или с другой, то есть асинхронно.*
- 2. Вращение поля статора (в двигателях) может быть реализовано использованием многофазной цепи питания переменного тока или специальной электронной коммутацией многофазных обмоток статора. Во втором случае формируются импульсы тока требуемой полярности, направляемые в соответствующую статорную обмотку.
(отмеченные положения в равной степени относятся и к машинам линейного перемещения).*

Машины переменного тока подразделяются на два основных вида: асинхронные и синхронные. Асинхронные и синхронные машины различаются по принципу действия, по устройству их роторов, но статоры

этих машин в подавляющем большинстве случаев имеют одинаковую конструкцию (см. рис.5.1). Сердечник 1 статора машин переменного тока, установленный в корпус 2 представляет собой полый цилиндр, который для снижения потерь на вихревые токи собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для изоляции листов друг от друга их покрывают или лаком или оксидной пленкой. На внутренней цилиндрической поверхности статора имеются пазы, в которых размещают обмотку. Элементом обмотки является катушка, состоящая из одного или нескольких витков. Элементы катушки, располагаемые в пазах, называют пазовыми сторонами 4, а элементы, расположенные вне пазов и служащие для соединения пазовых сторон, называют лобовыми частями 3. Обмотка статора состоит, как правило, из большого числа катушек, соединенных между собой определенным образом.

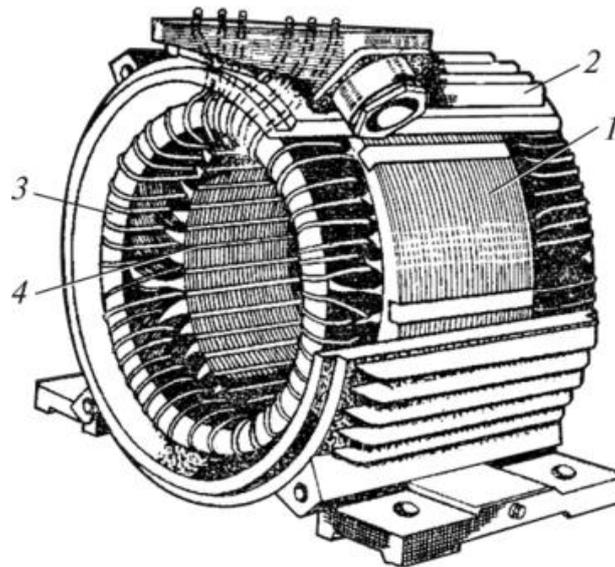


Рис. 5.1. Статор машины переменного тока

Часть дуги внутренней расточки статора, приходящаяся на один полюс, называется полюсным делением:

$$\tau = nD_1(2p), \quad (5.1)$$

где D_1 — внутренний диаметр статора; $2p$ — число полюсов. (Здесь и далее индекс 1 соответствует элементам статора, а индекс 2 — элементам ротора). Расстояние между пазовыми сторонами катушки, измеренное по внутренней поверхности статора, называется шагом обмотки

по пазам y_1 . Шаг обмотки выражают в пазах. Шаг обмотки называется полным или диаметральным, если он равен полюсному делению:

$$y_1 = Z_1 / (2p) = \tau, \quad (5.2)$$

где Z_1 - общее число пазов сердечника статора.

Если же шаг обмотки меньше полюсного деления ($y_1 < \tau$), то он называется укороченным. Наибольшее распространение имеют обмотки с укороченным шагом, так как в такой обмотке можно получить форму индуктируемой ЭДС, близкую к синусоидальной. Пазы, в которых располагаются проводники обмоток статора, имеют трапецеидальную форму для машин мощностью до 100 кВт и прямоугольную — для машин большей мощности. В машинах мощностью до 100 кВт выполняют насыпные обмотки из круглого изолированного провода. Проводники поочередно опускают (всыпают) в паз через шлиц, образованный соседними зубцами. После укладки обмотки в пазы сердечника статора ее пропитывают в специальных лаках. В процессе пропитки воздушные включения в обмотке и изоляции заполняются лаком, а обмотка приобретает монолитность, улучшаются ее теплопроводность, влагостойкость, электрическая и механическая прочность.

В машинах мощностью более 100 кВт и напряжением свыше 660 В для повышения электрической и механической прочности изоляции обмотки выполняют из жестких секций (катушек), которые укладывают в прямоугольные пазы. Секции наматывают на шаблонах из прямоугольного обмоточного провода, им придают окончательную форму со всеми характерными изгибами, затем изолируют, пропитывают в компаундах и в готовом виде укладывают в пазы. Если в пазу размещается только одна секционная сторона, то обмотка однослойная, а если две, то двухслойная. Обмотки машин переменного тока состоят из нескольких самостоятельных частей. Каждая часть называется обмоткой фазы. Различают одно-, двух- и трехфазные обмотки. Обмотка каждой фазы выполняется распределенной, т.е. она на каждом полюсном делении размещается в нескольких рядом лежащих пазах. По конфигурации катушек и последовательности соединения их друг с другом обмотки подразделяются на петлевые и волновые.

Электрическая изоляция обмотки - наиболее ответственный элемент электрической машины, в значительной степени определяющий ее габариты, вес, стоимость и надежность. Пазовые стороны обмотки статора расположены в пазах (рис.5.2), которые могут быть, полузакрытыми (а) полуоткрытыми (б) и открытыми (в).

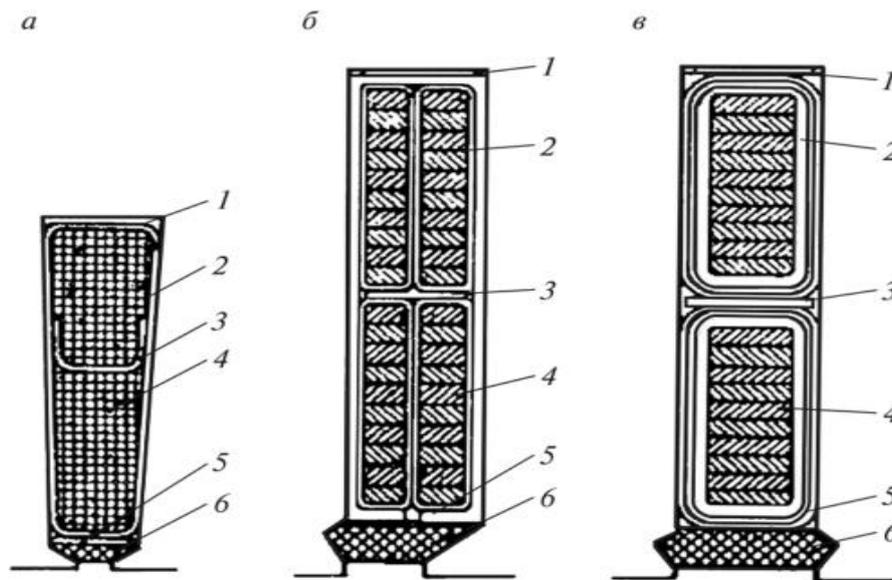


Рис. 5.2. Пазовая изоляция статорной обмотки

Перед укладкой проводников 4 обмотки поверхность паза прикрывают пазовой (корпусной) изоляцией 2 в виде пазовой коробочки. Этот вид изоляции должен иметь не только достаточную электрическую, но и необходимую механическую прочность, так как на него действуют значительные механические силы, возникающие в процессе работы машины, а особенно в процессе укладки проводников обмотки в пазах. В нижней части паза располагают прокладку 1. Электрическая изоляция проводников друг от друга обеспечивается витковой изоляцией, в качестве которой в машинах напряжением до 660 В используют изоляцию обмоточных проводов, а при напряжении 6000 В и выше эта изоляция требует усиления на каждый виток.

Роторы асинхронных двигателей выполняют двух видов: с короткозамкнутой и фазной обмотками. Первый вид двигателей называют асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором, а второй — асинхронными двигателями с фазным ротором или асинхронными двигателями с контактными кольцами. Наибольшее распространение имеют двигатели с короткозамкнутым ротором (рис.5.3), где применяют полузакрытые или закрытые пазы, имеющие овальную, прямоугольную или фигурную форму. Ширину открытия пазов выбирают равной примерно 1 мм. Закрытые пазы перекрывают сверху мостиком толщиной 0,3—0,5 мм.

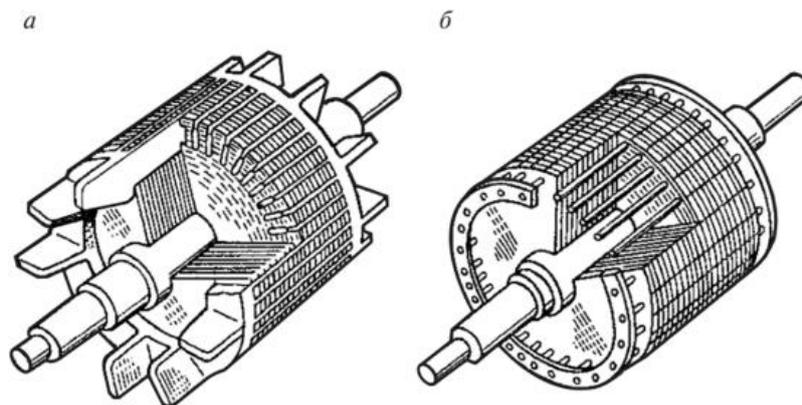


Рис. 5.3. Короткозамкнутый ротор с литой (а) и сварной (б) обмотками

У асинхронных двигателей с фазным ротором (рис. 5.4) в пазах ротора укладывают трехфазную обмотку аналогично обмотке статора. Обмотку соединяют «звездой», а три ее вывода подсоединяют к контактными кольцам, расположенным на валу машины. Кольца изолированы друг от друга и от вала машины и к ним через неподвижные щетки подсоединяют пусковой или регулировочный реостат. Добавочное сопротивление реостата служит для запуска двигателя с нагрузкой на его валу. Как только достигаются номинальные обороты вала, сопротивление отключается за ненадобностью, а кольца заворачиваются. В противном случае работа электродвигателя будет нестабильной, возникнут потери КПД. Роль добавочного внешнего сопротивления, как правило, выполняет ступенчатый реостат.

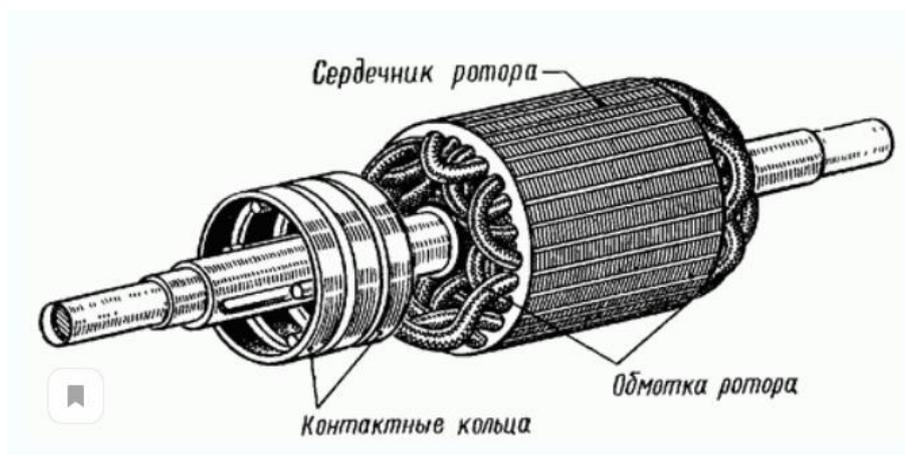


Рис. 5.4. Фазный ротор асинхронного двигателя

В этом случае двигатель будет разгоняться тоже ступенчато. Часто используются устройства, способные поднять КПД двигателя, при этом

избавляя щетки от излишнего трения о кольца. После разгона устройство поднимает щетки и замыкает кольца. Для реализации автоматического пуска электродвигателя используется подключенная индуктивность к обмотке ротора. Дело в том, что в тот момент, когда осуществляется пуск, в роторе показатели индуктивности и частоты тока максимальны. При разгоне двигателя эти показатели падают, а в конечном итоге двигатель выходит на нормальный рабочий режим.

Ротор классической синхронной машины имеет обмотку возбуждения и выполняется явнополюсным и неявнополюсным. Явнополюсный ротор синхронных машин (рис. 5.5) имеет выступающие полюсы, сердечник которых в мощных машинах набирают из пластин конструкционной стали толщиной 1—2 мм, а в машинах небольшой мощности — из электротехнической стали толщиной 0,5—1 мм. В машинах небольшой мощности полюсы крепят болтами к валу, а в тихоходных машинах большой мощности — к ободу ротора. В мощных и относительно быстроходных машинах полюсы крепят к ободу ротора с помощью «хвостов», имеющих Т-образную форму или форму ласточкиного хвоста.

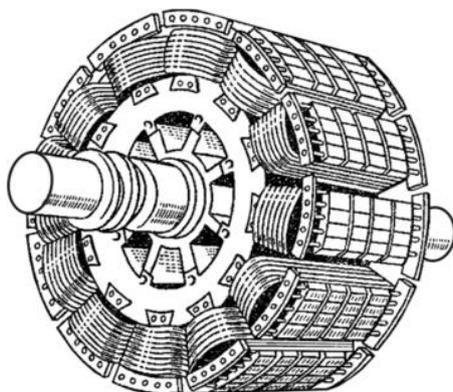


Рис. 5.5. Явнополюсный ротор синхронной машины

Такое крепление хотя технологически сложнее, но является более прочным, чем крепление болтами. Обмотку возбуждения в мощных машинах для лучшего охлаждения выполняют из неизолированных медных шин большого сечения, намотанных на ребро. Между соседними витками укладывают изоляционные прокладки, пропитанные в смоле. катушку запекают и устанавливают на полюсе, на который по периметру предварительно наносят корпусную изоляцию. В машинах небольшой мощности катушки обмотки возбуждения выполняют из изолированных проводников прямоугольного или круглого сечения.

При частоте вращения 1500 и 3000 об/мин синхронную машину, как правило, изготавливают с неявнополюсным ротором (рис.5.6).

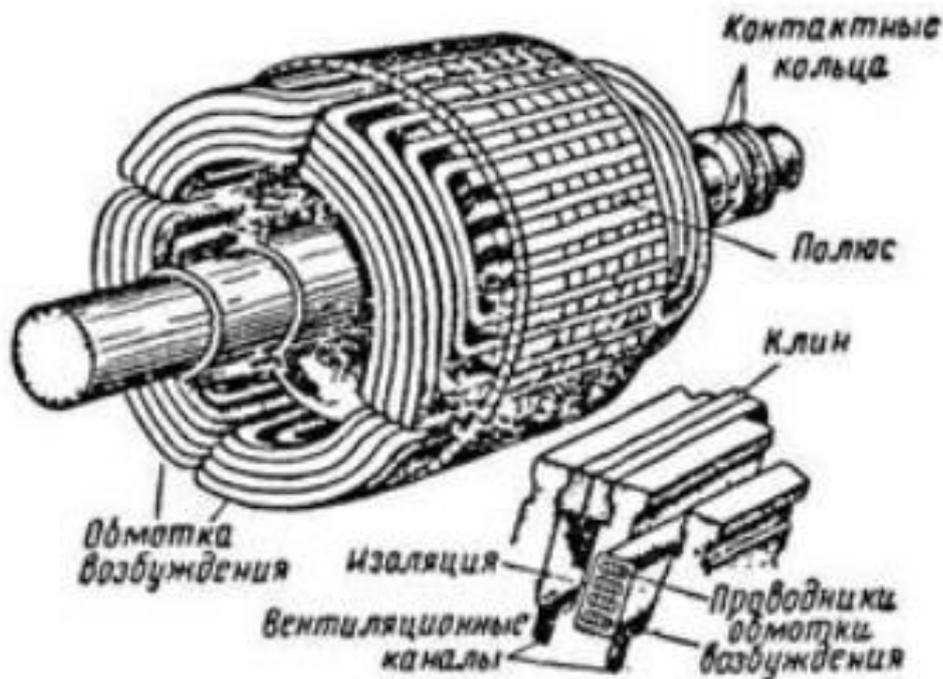


Рис. 5.6. Неявнополюсный ротор синхронной машины

На наружной поверхности массивной бочки, изготовленного из стальной поковки, фрезеруются пазы прямоугольной или трапециевидальной формы. Обмотку возбуждения, выполненную из полосовой меди, в такой машине размещают в пазах и укрепляют немагнитными металлическими клиньями. Лобовые части обмотки, на которые воздействуют значительные центробежные силы, крепят с помощью массивных кольцевых бандажей. При неявнополюсной конструкции обмотка возбуждения укладывается в пазы сердечника индуктора, весьма похоже на обмотку роторов асинхронных машин с фазным ротором, с той лишь разницей, что между полюсами оставляется место, не заполненное проводниками (так называемый большой зуб). Для получения в воздушном зазоре приблизительно синусоидального распределения магнитной индукции обмотку возбуждения укладывают в пазы, занимающие $2/3$ полюсного деления. Концы обмотки возбуждения выводят к двум контактными кольцам, расположенным на валу и изолированным как друг от друга, так и от тела ротора. К контактными кольцам через щетки подается постоянный ток. Устройство специальных синхронных машин рассмотрено в разделе 6.

5.2. Вращающееся магнитное поле в машинах переменного тока

Особенностью многофазных систем переменного тока является возможность создать в механически неподвижном устройстве вращающееся магнитное поле. Катушка, подключенная к источнику переменного тока, образует пульсирующее магнитное поле, т.е. магнитное поле, изменяющееся по величине и направлению. Возьмем цилиндр с внутренним диаметром D . На поверхности цилиндра разместим три катушки $AХ$, $ВУ$ и $СZ$ пространственно смещенные относительно друга на 120° (A , B и C – начала катушек) Катушки подключим к источнику трехфазного напряжения (рис. 5.7).

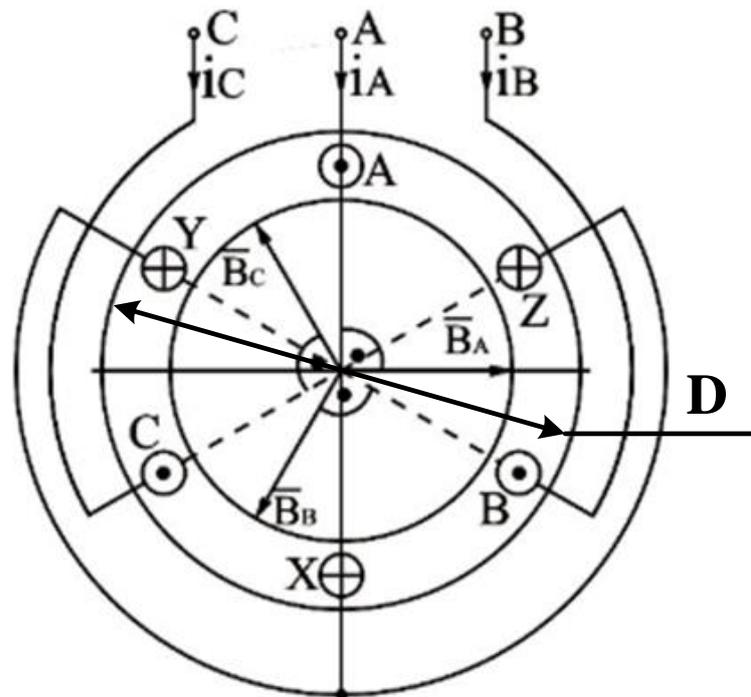


Рис. 5.7. Подключение трех катушек к трехфазной сети

На рис. 5.8 приведен график изменения мгновенных токов, образующих трехфазную систему.

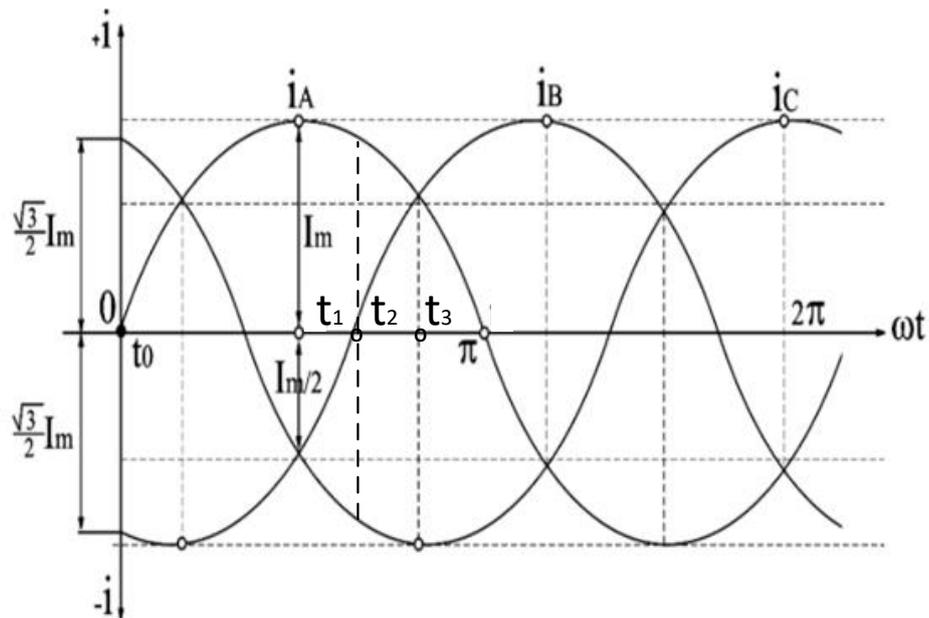


Рис. 5.8. График изменения мгновенных токов

Каждая из катушек создает пульсирующее магнитное поле. Магнитные поля катушек, взаимодействуя друг с другом, образуют результирующее вращающееся магнитное поле, характеризующееся вектором результирующей магнитной индукции. На рис. 5.9 изображены векторы магнитной индукции каждой фазы и результирующий вектор построенные для трех моментов времени t_1 , t_2 , t_3 . Положительные направления осей катушек обозначены +1, +2, +3.

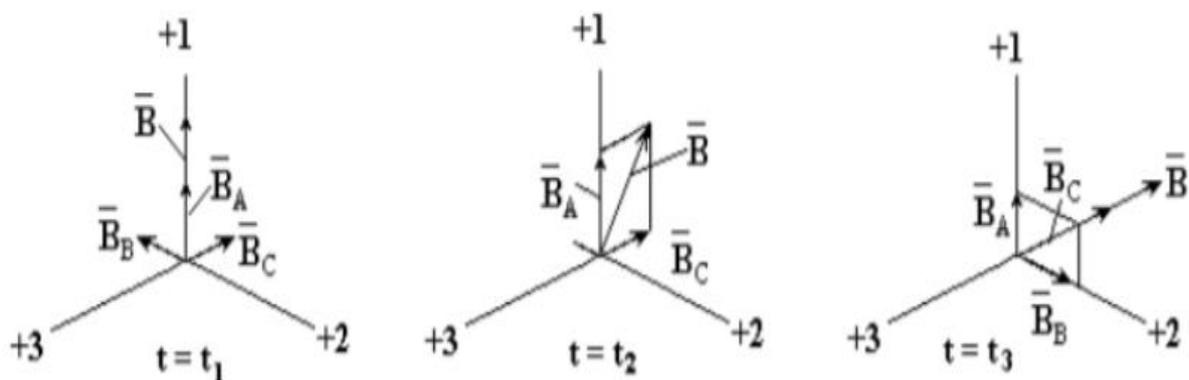


Рис. 5.9. Векторы магнитной индукции каждой фазы и результирующий вектор

В момент времени $t = t_1$ ток и магнитная индукция в катушке А-Х положительны и максимальны, в катушках В-У и С-З - одинаковы и отрицательны. Вектор результирующей магнитной индукции равен

геометрической сумме векторов магнитных индукций катушек и совпадает с осью катушки А-Х. В момент $t = t_2$ токи в катушках А-Х и С-Z одинаковы по величине и противоположны по направлению. Ток в фазе В равен нулю. Результирующий вектор магнитной индукции повернулся по часовой стрелке на 30° . В момент $t = t_3$ токи в катушках А-Х и В-У одинаковы по величине и положительны, ток в фазе С-Z максимален и отрицателен, вектор результирующего магнитного поля размещается в отрицательном направлении оси катушки С-Z. За период переменного тока вектор результирующего магнитного поля повернется на 360° . Линейная скорость перемещения вектора магнитной индукции V_1 определяется по выражению

$$V_1 = \frac{\pi D}{T} = \pi D f_1 = \pi D f n_1, \quad (5.3)$$

где f_1 - частота переменного напряжения; T - период синусоидального тока; n_1 - частота вращения магнитного поля или синхронная частота вращения. За период T магнитное поле перемещается на расстояние 2τ , где τ - полюсное деление или расстояние между полюсами магнитного поля по длине окружности цилиндра диаметром D . Катушки, изображенные на рис. 5.7, создают двухполюсное магнитное поле, с числом полюсов $2P = 2$. Частота вращения поля равна 3000 об/мин. Чтобы получить четырехполюсное магнитное поле, необходимо внутри цилиндра диаметром D поместить шесть катушек, по две на каждую фазу. Тогда магнитное поле будет вращаться в два раза медленнее с частотой $n_1 = 1500$ об/мин. Чтобы получить вращающееся магнитное поле, необходимо выполнить два условия:

1. Иметь хотя бы две пространственно смещенные катушки.
2. Подключить к катушкам несовпадающие по фазе токи.

5.3. Асинхронный двигатель

Поскольку асинхронные генераторы используются достаточно редко, а их устройство и принцип действия достаточно очевидны, ограничимся рассмотрением особенностей работы только асинхронных двигателей, которые используются в электромобилях. Асинхронные двигатели в настоящее время являются наиболее распространенными электрическими машинами из-за своей конструктивной простоты, низкой стоимости, высокой эксплуатационной надежности, широкого диапазона мощностей - от долей ватта до нескольких тысяч киловатт. Они

имеют относительно высокий КПД. Наряду с большими достоинствами асинхронные двигатели имеют и некоторые недостатки. К их числу следует отнести потребление из сети реактивного тока, необходимого для создания магнитного потока, в результате чего асинхронные двигатели работают с $\cos \phi$. Асинхронные двигатели изготавливаются для работы в однофазных, двухфазных и трехфазных сетях переменного тока, но главным образом - для трехфазных сетей. Как было сказано ранее, сердечник статора, представляющий собой полый цилиндр, набирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5—0,35 мм. Сердечник (пакет) ротора также собирают из листов электротехнической стали, которые штампуют одновременно с листами статора. Обмотку ротора выполняют путем заливки в пазы под давлением расплавленного алюминиевого сплава. Одновременно с обоих торцов ротора отливают алюминиевые кольца, замыкающие стержни пазов. Для усиления охлаждения двигателя вместе с кольцами отливают примыкающие к ним вентиляционные лопасти. Таким образом, короткозамкнутая обмотка ротора представляет собой клетку наподобие беличьей. В электрическом отношении она является многофазной обмоткой с числом фаз, равным числу стержней (пазов). Вал ротора вращается в подшипниках, которые укреплены в боковых щитах, называемых подшипниковыми щитами. В асинхронных машинах применяются подшипники качения. Подшипниковые щиты прикрепляют болтами к корпусу статора. В корпус запрессовывают сердечник статора. Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного статора и вращающегося ротора. При этом обмотка статора включается в сеть и является как бы первичной, а обмотка ротора — вторичной, так как энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками. Обмотка статора представляет собой трехфазную обмотку, катушки которой размещаются равномерно по окружности статора и сдвинуты одна от другой на угол 120° . Катушки обмотки соединяются по схеме «звезда» или «треугольник» и подключаются к сети трехфазного тока. Принцип работы асинхронного двигателя заключается в следующем: при включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле Φ статора, частота вращения которого определяется выражением:

$$n_1 = 60 \frac{f_1}{p}, \quad (5.4)$$

Вращающееся магнитное поле сцепляется как с обмоткой статора, так и с обмоткой ротора, и наводит в них ЭДС. При этом ЭДС обмотки

статора, являясь ЭДС самоиндукции, действует встречно приложенному к обмотке напряжению и ограничивает значение тока в обмотке. Обмотка ротора замкнута, поэтому ЭДС ротора создает в стержнях обмотки ротора токи. Взаимодействие этих токов с полем статора создает на роторе электромагнитные силы $P_{эм}$, направление которых определяется «правилом левой руки». Силы $P_{эм}$ стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора.

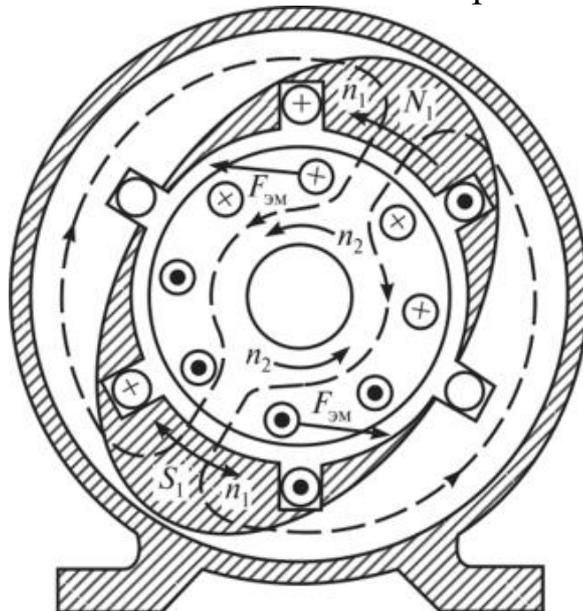


Рис. 5.10. Принцип действия асинхронного двигателя

Совокупность сил $P_{эм}$ создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение с частотой n_2 . Направление вращения магнитного поля статора и, следовательно, направление вращения ротора зависят от порядка следования фаз напряжения, подводимого к обмотке статора. Частота вращения ротора n_2 называется асинхронной и всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора, так как только в этом случае происходит наведение ЭДС в обмотке ротора асинхронного двигателя и появляется электромагнитный момент. Отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля называется скольжением S и выражается в относительных единицах или процентах:

$$S = (n_1 - n_2)/n_2 \quad \text{или} \quad S(\%) = S \cdot 100. \quad (5.4)$$

Скольжение зависит от нагрузочного (тормозного) момента, приложенного к валу электродвигателя. Чем больше нагрузочный момент M_n , тем больше должен быть уравновешивающий его электромагнитный момент M , следовательно, тем больше должна быть разность

частот вращения $n_1 — n_2$, т.е. S . Обычно при номинальной нагрузке $S = (2—6) \%$. При пуске двигателя $n_2 = 0$ и $S = 1$; при идеальном холостом ходе (отсутствие нагрузки и отсутствие трения) $n_2 = n_1$ и $S = 0$. В реальных условиях при холостом ходе двигатель работает с некоторым небольшим скольжением. Частота вращения ротора может быть определена по формуле

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1 - S). \quad (5.5)$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Зависимость момента от скольжения $M = f(S)$ при постоянстве параметров питания называется механической характеристикой. Механическая характеристика асинхронного двигателя $M = f(S)$ показана на рис. 5.11. При включении двигателя в сеть магнитное поле статора, не обладая инерцией, сразу же начинает вращение с синхронной частотой n_1 , в то же время ротор двигателя под влиянием сил инерции в начальный момент пуска остается неподвижным ($n_2 = 0$) и скольжение равно единице ($S = 1$). На ротор действует пусковой момент. Под действием этого момента начинается вращение ротора двигателя, при этом скольжение уменьшается, а вращающий момент возрастает. При критическом скольжении $S_{кр}$ момент достигает максимального значения $M_{макс}$. С дальнейшим нарастанием частоты вращения (уменьшением скольжения) момент M начинает убывать, пока не достигнет установившегося значения, равного сумме противодействующих моментов, приложенных к ротору двигателя: момента холостого хода M_0 и полезного нагрузочного момента (момента на валу двигателя) M_2 . Если противодействующий момент на валу двигателя M_2 соответствует номинальной нагрузке двигателя, то установившийся режим работы двигателя определится точкой на механической характеристике с координатами $M_{ном}$ и $S_{ном}$, где $M_{ном}$ и $S_{ном}$ — номинальные значения электромагнитного момента и скольжения соответственно. Устойчивая работа асинхронного двигателя возможна при скольжениях меньше критического ($S < S_{кр}$), т.е. на участке $0A$ механической характеристики (см. рис. 5.11), так как именно на этом участке изменение нагрузки на валу двигателя сопровождается соответствующим изменением электромагнитного момента.

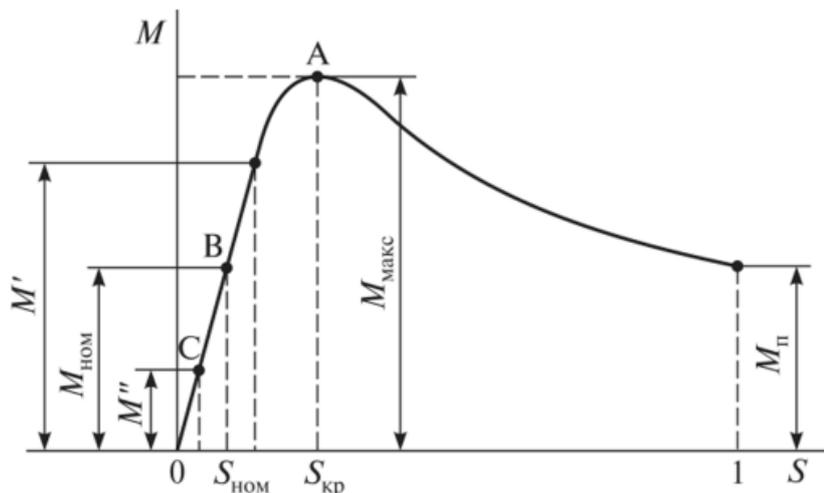


Рис. 5.11. Механическая характеристика асинхронного двигателя

При увеличении нагрузочного момента частота вращения ротора начнет убывать (скольжение будет увеличиваться), что приведет к росту электромагнитного момента M' (точка В), после чего режим работы двигателя вновь станет установившимся. При уменьшении нагрузочного момента частота вращения начнет возрастать (скольжение будет уменьшаться), что приведет к уменьшению электромагнитного момента M' и уменьшению электромагнитного момента M'' (точка С). Устойчивый режим работы будет вновь восстановлен, но уже при других значениях M и S . Работа асинхронного двигателя становится неустойчивой при скольжениях S больше или равных $S_{кр}$. Если электромагнитный момент двигателя $M = M_{макс}$, а скольжение $S = S_{кр}$, то даже небольшое увеличение нагрузочного момента, вызвавшее увеличение скольжения S , приведет к уменьшению электромагнитного момента. За этим последует дальнейшее увеличение скольжения и т.д., пока скольжение не достигнет значения $S = 1$, т.е. пока ротор не остановится. Таким образом, при достижении электромагнитным моментом максимального значения наступает предел устойчивой работы асинхронного двигателя. Чтобы случайные кратковременные перегрузки не вызывали остановки двигателя, необходимо, чтобы он обладал перегрузочной способностью. Перегрузочная способность двигателя определяется отношением максимального момента к номинальному. Для асинхронных двигателей общего назначения перегрузочная способность составляет 1,7—2,5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис. 5.12) представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения n_2 , КПД (η), полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos\varphi$ и тока статора I_1 от полезной

мощности P_2 при постоянстве параметров питания (напряжении и частоте). *Скоростная характеристика* $n_2 = f(P_2)$. По мере увеличения нагрузки на валу двигателя скольжение S возрастает, достигая значений 0,01—0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс.

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Зависимость полезного момента M_2 на валу двигателя от полезной мощности P_2 определяется выражением:

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 9,55 P_2 / n_2, \quad (5.6)$$

где P_2 — полезная мощность; ω_2 — угловая скорость вращения ротора. Из этого выражения следует, что если $n_2 = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ представляет собой прямую линию.

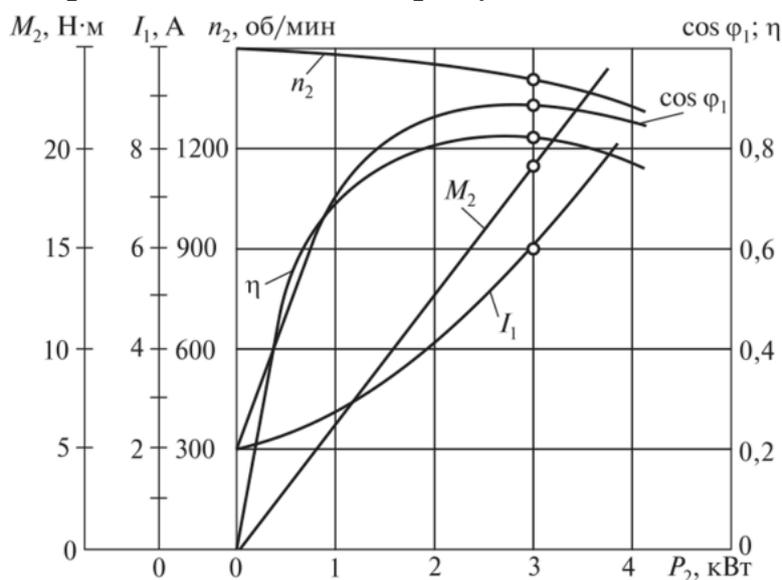


Рис. 5.12. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Но в асинхронном двигателе с увеличением нагрузки P_2 частота вращения ротора уменьшается, поэтому полезный момент на валу M_2 с увеличением нагрузки возрастает несколько быстрее нагрузки, следовательно, график $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид.

Зависимость $\cos \varphi = f(P_2)$. В связи с тем, что ток статора I_1 , имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности асинхронных двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму холостого хода, при этом он не превышает 0,2. При увеличении нагрузки на валу двигателя растет активная составляющая тока I , и коэффициент мощности возрастает, дости-

гая наибольшего значения (0,8—0,9) при нагрузке, близкой к номинальной. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos\varphi$, что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора за счет увеличения скольжения и, следовательно, частоты тока в роторе.

5.4. Устройство и возбуждение синхронных генераторов

В синхронных генераторах (СГ) ротор, создающий магнитный поток возбуждения, вращается от стороннего источника движения, а в обмотке статора индуцируется ЭДС. Существуют генераторы с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов. Рассмотрим принцип действия СГ с электромагнитным возбуждением.

На рис. 5.13 приведена электромагнитная схема генератора (а), а также схема ее включения (б). На статоре 1 (рис. 5.13, а) размещена трехфазная (в общем случае многофазная) обмотка 3. На роторе 2 расположена обмотка 4, которая служит для создания магнитного потока возбуждения (обмоткой возбуждения) и которую подключают к источнику постоянного тока. Здесь обозначено: 1 – статор, 2 – ротор, 3 – обмотка якоря, 4 – обмотка возбуждения, 5 – контактные кольца, 6 – щетки. Обмотку ротора соединяют с внешним источником постоянного тока через медные контактные кольца 5 и графитовые щетки 6.

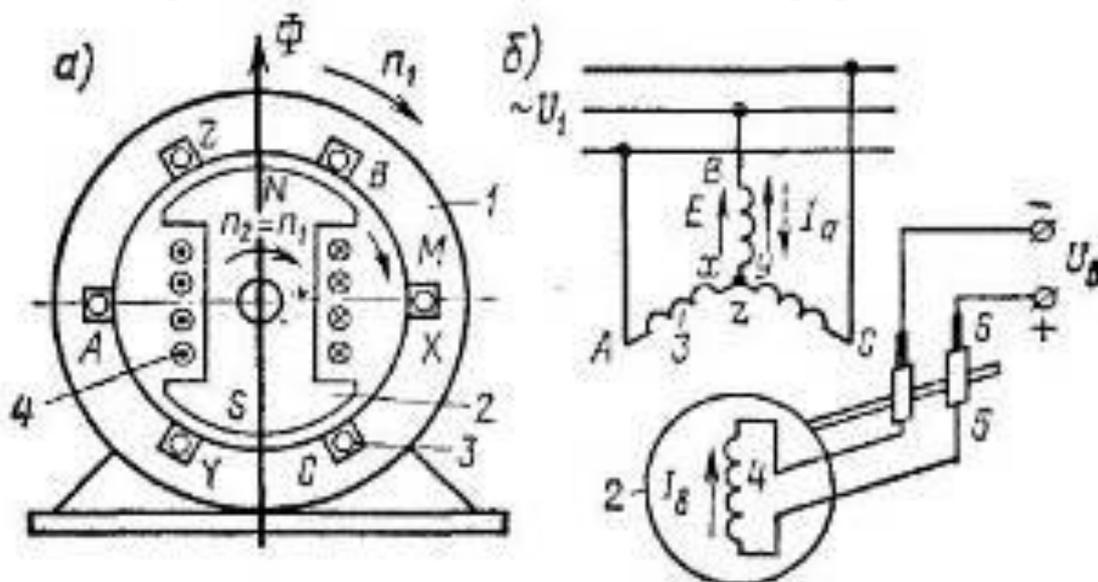


Рис. 5.13. Электромагнитная схема СМ (а) и схема ее включения (б)

При вращении ротора 2 с некоторой частотой n_2 поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС (E) (рис. 5.13, б), с частотой, величина которой f_1 определяется по выражению

$$f_1 = p n_2 / 60, \quad (5.7)$$

где p – число пар полюсов. При подключении обмотки статора к какой-либо нагрузке протекающий по этой обмотке многофазный ток I_a создаст вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется выражением

$$n_1 = 60 f_1 / p. \quad (5.8)$$

Из выражений (5.7) и (5.8) следует, что $n_1 = n_2$, то есть магнитное поле статора вращается с той же частотой что и ротор, то есть синхронно. Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ формируется совместным действием магнитодвижущих сил (МДС) обмотки возбуждения и обмотки статора и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

В СГ обмотку, в которой индуцируется ЭДС и протекает ток нагрузки, называют обмоткой якоря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, – индуктором. На рис. 5.13 статор является якорем, а ротор – индуктором. Для электрической машины безразлично, вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют СМ с обращенной конструктивной схемой: обмотка якоря, к которой подключена нагрузка, расположена на роторе, а обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, – на статоре. СГ может работать автономно в качестве генератора, питающего подключенную к ней нагрузку, или параллельно с другими генераторами. В результате взаимодействия поля с током, протекающим по обмотке ротора, создается электромагнитный момент, который в генераторном режиме является тормозным. В установившихся режимах ротор неподвижен относительно магнитного поля и вращается вместе с ним с частотой вращения $n_1 = n_2$, независимо от механической нагрузки на валу ротора или электрической нагрузки. Частота изменения ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря, пропорциональна частоте вращения ротора, а в обмотке ротора ЭДС не индуцируется, а ее МДС определяется только током возбуждения и не зависит от режима работы. СГ выполняют с неподвижным или вращающимся якорем. Машины большой мощности для удобства отвода электрической энергии со статора или подвода ее выполняют с неподвижным якорем. СГ не-

большой мощности выполняют как с неподвижным, так и с вращающимся якорем. Полюсы ротора в генераторе бывают явновыраженными и неявновыраженными. На рис. 5.14 приведено схематичное устройство СГ с явновыраженными (схема а) и неявновыраженными (схема б) полюсами.

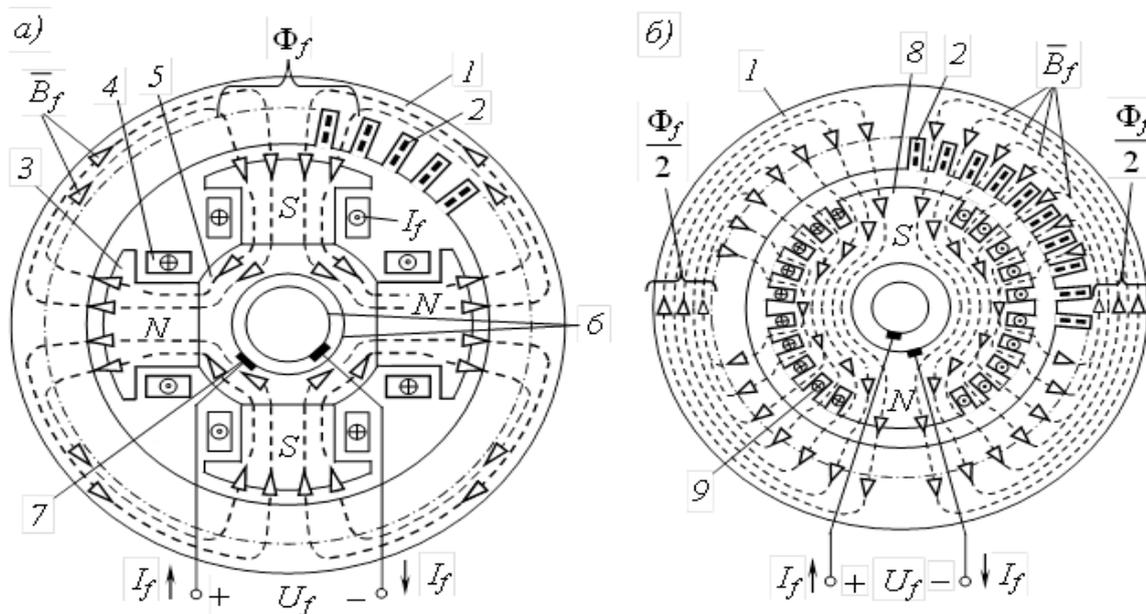


Рис.5.14. Схема явнополюсного и неявнополюсного СГ

На рис. 5.14 обозначено: 1- магнитопровод статора; 2- паз статора с катушками обмотки якоря; 3- магнитопровод полюса; 4- катушка обмотки возбуждения; 5- втулка; 6- контактное кольцо; 7-щётка; 8-магнитопровод ротора; 9-паз ротора с катушкой обмотки возбуждения. Пунктирными линиями показаны силовые линии основного магнитного потока Φ_f . U_f и I_f – напряжение и сила тока обмотки возбуждения. B_f – линии магнитной индукции.

Синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) являются бесконтактными и имеют простую электрическую схему, не потребляют энергии на возбуждение и имеют повышенный КПД, отличаются высокой надежностью работы, менее чувствительны к действию реакции якоря, чем обычные машины. Недостатки обусловлены невысокими регулируемыми свойствами поскольку рабочий поток постоянных магнитов нельзя изменять в широких пределах. В то же время во многих случаях эта особенность не является определяющей и не препятствует широкому их применению. Подавляющее большинство СГПМ, применяемых в настоящее время, имеют магнитную систему с постоянными магнитами, которые вращаются. Вследствие этого магнитные системы отличаются друг от друга в основном конструкцией

ротора (индуктора). Статор же СГПМ имеет практически такую же конструкцию, что и в классических машинах переменного тока. Он содержит набранный из листов электротехнической стали цилиндрический магнитопровод, на внутренней поверхности которого расположены пазы для размещения обмотки якоря. В отличие от обычных синхронных машин рабочий промежуток между статором и ротором в СГПМ выбирают минимальным, исходя из технологических возможностей. Конструкция ротора в значительной степени определяется магнитными и технологическими свойствами магнитотвердого материала.

Достаточно простым является ротор с однородным цилиндрическим магнитом кольцеобразного типа (рис. 5.15, а).

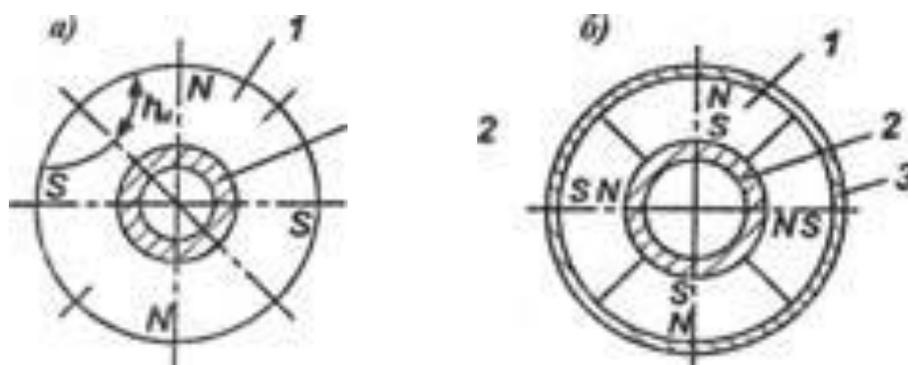


Рис. 5.15. Роторы с цилиндрическим магнитом: а - монолитный, б - сборный

Постоянный магнит 1 выполнен литым, крепится на валу с помощью втулки 2, например, из сплава алюминия. Намагничивание магнита осуществляется в радиальном направлении на многополюсной установке, намагничивающей. Поскольку механическая прочность магнитов небольшая, то при высоких линейных скоростях магнит помещают в оболочку (бандаж) из немагнитного материала. Разновидностью ротора с цилиндрическим магнитом является сборный ротор из отдельных сегментов 1 из немагнитной стальной оболочкой 3 (рис. 5.15, б). Радиально намагниченные сегментные магниты 1 размещены во втулке 2 из магнитомягкой стали и закреплены любым способом, например, с помощью клея, закреплены. СГ с ротором подобной конструкции при стабилизации магнита в свободном состоянии имеют форму кривой ЭДС, близкую к синусоидальной. Преимуществом роторов с цилиндрическим магнитом является простота и технологичность изготовления. Недостатком - низкое использование объема магнитного материала вследствие небольшой длины средней силовой линии полюса. При увеличении числа полюсов использование объема магнита ухудшается.

В синхронных генераторах с постоянными магнитами мощностью до 5 кВА широкое распространение получили роторы звездообразного типа с явно выраженной полюсами без полюсных башмаков (рис. 5.16, а). В данной конструкции магнит-звездочку обычно крепят на валу с помощью заливки немагнитным сплавом 2. Магнит может также располагаться прямо на валу. целью снижения размагничивающей действия поля реакции якоря при ударном токе короткого замыкания на роторе в ряде случаев предполагается демпферная система 3.

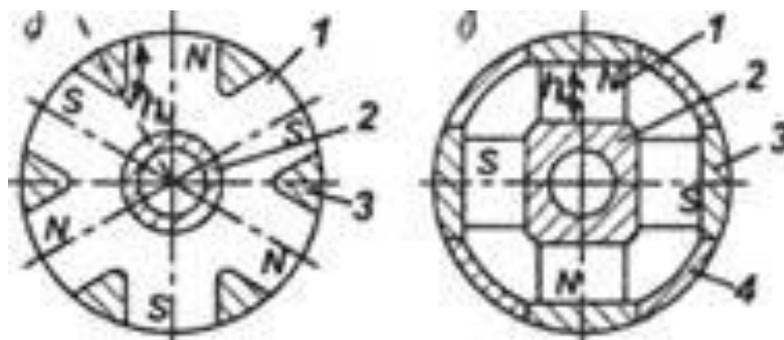


Рис. 5.16. Роторы звездообразного типа: а - без полюсных башмаков; б - сборный с полюсными башмаками

Это осуществляется, как правило, путем заливки ротора алюминием. При больших частотах вращения на магнит устанавливается немагнитный бандаж методом горячего прессования. В то же время при перегрузках генератора поперечная реакция якоря может вызвать несимметричное перемагничивания краев полюсов. Такое перемагничивание искажает форму поля в рабочем промежутке и форму кривой ЭДС. Для уменьшения действия поля якоря на поле магнита применяются полюсные башмаки из магнитомягких сталей. Изменением ширины полюсных башмаков (регулируя поток рассеяния полюсов), можно добиться оптимального использования магнита. Дополнительно изменяя конфигурацию полюсных башмаков, можно получить необходимую форму поля в рабочем промежутке генератора. На рис. 5.16, б представлена конструкция сборного ротора звездообразного типа с призматическими постоянными магнитами с полюсными башмаками. Магниты 1 установлены на втулке 2 из магнитомягких материалов. На полюсе магнитов установлены полюсные башмаки 3 с магнитной стали.

В генераторах с большим числом полюсов широко используется конструкция ротора с когтеобразными полюсами, изображенная на рис. 5.17, используемая в автомобильных генераторах. На роторе расположен цилиндрический магнит 1, намагниченный в аксиальном направлении, размещенный на немагнитных втулке 2.

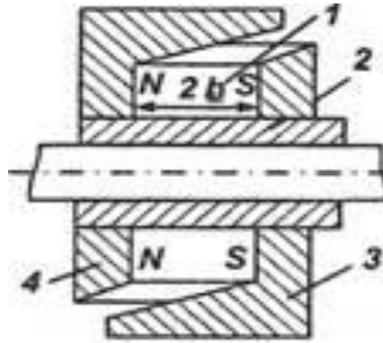


Рис. 5.17. Ротор когтеобразные типа

К торцам магнита примыкают фланцы 3 и 4 из магнитомягкой стали, которые имеют когтеобразные выступления, образующие полюса. Выступы левого фланца является северными полюсами, а выступы правого фланца - южными. Выступы фланцев чередуются по окружности ротора, образуя многополюсную систему возбуждения. Мощность генератора можно существенно повысить, если применить модульный принцип, расположив на валу несколько магнитов с когтеобразные полюсами. Существенными недостатками роторов когтеобразные типа являются относительная сложность конструкции, трудность намагничивания магнита в собранном роторе и большие потоки рассеяния. Кроме этого возможен отгиб концов выступов при высоких частотах вращения.

На рис. 5.18 приведена классификация систем возбуждения синхронных генераторов. Чаще всего для возбуждения синхронных машин применяют системы независимого возбуждения и системы самовозбуждения. При независимом возбуждении для питания обмоток возбуждения основной синхронной машины обычно используют электромашинные возбудители – генераторы постоянного тока или синхронные генераторы и возбуждение машины не зависит от напряжения на якоре. При размещении ротора возбудителя находится на одном валу с ротором синхронной машины, то систему возбуждения называют *прямой*. В случае самовозбуждения для возбуждения синхронной машины используют энергию переменного тока обмотки якоря. Самовозбуждение машины происходит за счет остаточного потока в роторе. Относительно передачи энергии в обмотку возбуждения различают СГ со щетками и без щеток.



Рис. 5.18. Классификация систем возбуждения синхронных генераторов

Принципиальная схема СГ со щетками представлена на рис.5.19. В этой схеме обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного тока через скользящие контакты, осуществляемые посредством двух неподвижных щеток и двух колец, расположенных на валу (изолированных от вала и одно от другого). Источником возбуждения здесь служит сам генератор.

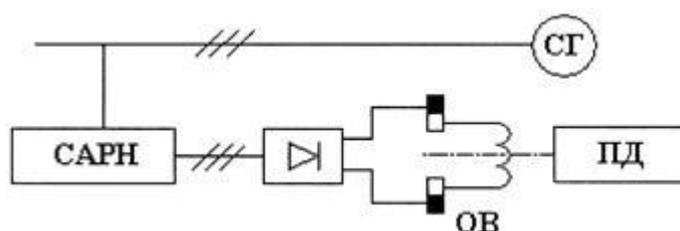


Рис. 5.19. Схема системы возбуждения синхронного генератора со щетками

Здесь САРН – система автоматического регулирования напряжения; ОВ – обмотка возбуждения; ПД – первичный двигатель. Существует достаточно много разновидностей бесщеточных синхронных генераторов. На рис.5.20 представлен один из вариантов такого генератора с электромашинным возбудителем.

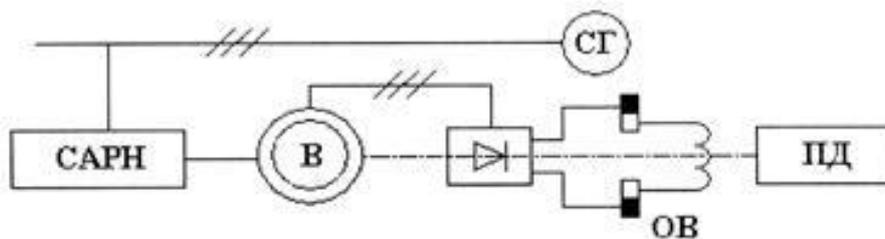


Рис. 5.20. Схема системы возбуждения бесщеточного синхронного генератора с возбудителем (В)

Для регулирования тока возбуждения применяют разные системы, в которых использованы следующие принципы регулирования:

- 1) по отклонению (U);
- 2) по возмущению: - токовое компаундирование – компенсация изменения тока нагрузки (I); - амплитудно-фазовое компаундирование (фазовое компаундирование) - компенсация изменения тока и коэффициента мощности нагрузки ($I, \cos \varphi$);
- 3) комбинированное – сочетание систем, использующих регулирование по отклонению и по возмущению. В ЭЭС применяют все три вида систем регулирования напряжения синхронных генераторов. Каждая из них имеет свои области применения, определяемые параметрами генераторов.

Регулирование по отклонению, как известно, позволяет компенсировать изменение напряжения при любых видах возмущающих воздействий.

Схемы возбуждения, построенные по этому принципу, целесообразно использовать для генераторов с высоким значением ОКЗ, так как в этом случае регулируемая мощность системы возбуждения будет иметь меньшее значение. Эти схемы характеризуются большим значением коэффициента усиления по мощности и имеют тенденцию к автоколебательному режиму.

Источник возбуждения. Питать обмотку возбуждения можно от независимого источника электроэнергии (возбудителя) и/или от собственных шин генератора. Системы, в составе которых есть независимый источник энергии, относят к системам косвенного действия. Недостатки таких систем очевидны: они имеют повышенные массогабаритные показатели и ухудшенные показатели по быстродействию, так как к инерционности генератора и системы добавляется инерционность возбудителя. Примером такой системы может служить регулятор УБК-М в генераторах серии МС.

Системы прямого действия не имеют независимого источника энергии и для возбуждения используют энергию самого генератора. Регулирующее воздействие в таких системах осуществляется непосредственно в цепи возбуждения генератора. Конструктивно систему возбуждения располагают над статором генератора рядом с воздухоохладителем.

Системы прямого компаундирования. В системах прямого компаундирования ток обмотки возбуждения СГ должны определять две составляющие, пропорциональные напряжению и току. Составляющая, пропорциональная напряжению, необходима для обеспечения режима холостого хода и создания основного потока возбуждения. Составляющая, пропорциональная току нагрузки, служит для компенсации тех факторов, которые вызывают снижение напряжения при изменении нагрузки, а также для обеспечения необходимого для срабатывания защитной аппаратуры значения установившегося тока короткого замыкания.

Для генераторов с низким ОКЗ применяют, как правило, схемы возбуждения, реагирующие на значение и коэффициент мощности нагрузки, то есть схемы амплитудно-фазового (фазового) компаундирования. *Комбинированное регулирование* осуществляют введением в системы компаундирования обратной связи по отклонению, что повышает точность регулирования. Основную роль в таких системах играет канал по возмущению. Канал по отклонению служит для устранения второстепенных возмущений и имеет небольшую мощность. Часто его выполняют в виде корректора напряжения, который имеет два способа включения – на обмотку возбуждения или на элемент системы на стороне переменного тока. Питая обмотку возбуждения можно от независимого источника электроэнергии (возбудителя) и/или от собственных шин генератора. Системы, в составе которых есть независимый источник энергии, относят к системам косвенного действия. Недостатки таких систем очевидны: они имеют повышенные массогабаритные показатели и ухудшенные показатели по быстродействию, так как к инерционности генератора и системы добавляется инерционность возбудителя. Примером такой системы может служить регулятор УБК-М в генераторах серии МС. Системы прямого действия не имеют независимого источника энергии и для возбуждения используют энергию самого генератора. Регулирующее воздействие в таких системах осуществляется непо-

средственно в цепи возбуждения генератора. Конструктивно систему возбуждения располагают над статором генератора рядом с воздухоохладителем.

Системы прямого компаундирования. В системах прямого компаундирования ток обмотки возбуждения СГ должны определять две составляющие, пропорциональные напряжению и току. Составляющая, пропорциональная напряжению, необходима для обеспечения режима холостого хода и создания основного потока возбуждения. Составляющая, пропорциональная току нагрузки, служит для компенсации тех факторов, которые вызывают снижение напряжения при изменении нагрузки, а также для обеспечения необходимого для срабатывания защитной аппаратуры значения установившегося тока короткого замыкания. Рассмотрим более подробно схемы типовых систем возбуждения наиболее широко применяемых в синхронных генераторах.

Исторически первыми системами являлись системы, в которых возбуждение синхронных машин осуществлялось электромашинными системами возбуждения с коллекторным генератором постоянного тока параллельного или независимого возбуждения в качестве возбудителя. На рис. 5.21 приведена схема электромашинной системы возбуждения с генератором постоянного тока.

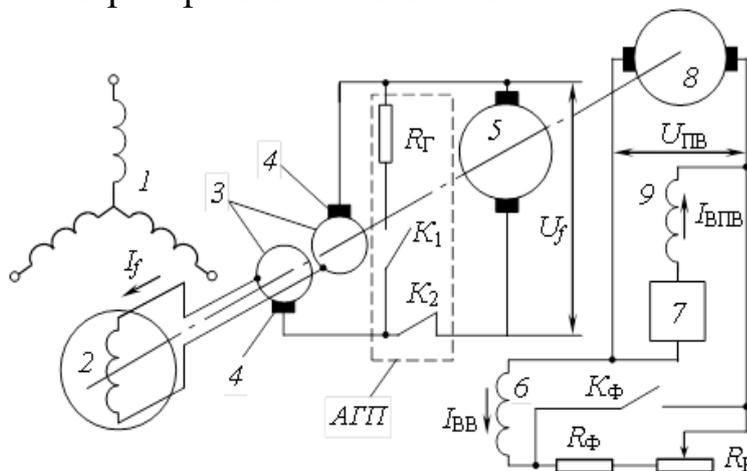


Рис. 5.21. Схема электромашинной системы возбуждения с генератором постоянного тока

Здесь обозначено: 1 - обмотка якоря; 2 - обмотка возбуждения; 3 – контактные кольца; 4 – щетки; 5 – обмотка якоря возбудителя; 6 - обмотка возбуждения возбудителя; 7 – регулятор возбуждения; 8 - обмотка якоря подвозбудителя; 9 - обмотка возбуждения подвозбудителя.

Изменение величины тока I_f выполняется только за счет напряжения возбудителя U_f , которое регулируется током возбуждения $I_{ВВ}$ возбудителя. Вместе с тем ток возбуждения возбудителя $I_{ВВ}$ зависит от напряжения подвозбудителя $U_{ПВ}$, которое регулируется его током возбуждения $I_{ВПВ}$.

С целью повышения скорости уменьшения тока возбуждения до нуля (гашения поля) применяют устройство, называемое автоматом гашения поля (АГП). В простейшем случае АГП это гасительное сопротивление $R_{Г}$, величина которого в 4–6 раз больше сопротивления обмотки возбуждения r_f и контакторов K_1, K_2 . АГП служит для предохранения от повреждения изоляцию обмотки возбуждения и контакт K_2 . В случае отключения обмотки возбуждения сначала замыкается дугогасительный контакт K_1 и включает обмотку возбуждения на гасительное сопротивление $R_{Г}$, затем размыкают рабочий контакт K_2 . Энергия, которая запасается в магнитном поле возбуждения, гасится на сопротивлении $R_{Г}$ и значительной электрической дуги опасной для контакта K_2 не возникает. Одновременно с этим из-за наличия сопротивления $R_{Г}$ уменьшается скорость затухания тока возбуждения I_f и ЭДС самоиндукции $e_{ff} \equiv d I_f / d t$ в обмотке возбуждения, которая может вызвать пробой изоляции обмотки.

С целью форсировки тока возбуждения подается сигнал на замыкание контакта $K_{Ф}$, шунтирующего форсировочный $R_{Ф}$ и регулировочный $R_{Р}$ резисторы в цепи обмотки возбуждения возбудителя. При этом напряжение возбудителя U_f довольно быстро возрастает до предельного значения $U_{fм}$.

К достоинствам электромашинных систем возбуждения с возбудителями постоянного тока можно отнести простоту, малую стоимость и высокую надежность. Недостатками являются небольшая кратность форсировки $k_{fм} \leq 2$, большие постоянные времени 0,3–0,6 с и соответственно небольшие скорости нарастания напряжения возбуждения 1,5–2,5 о.е./с. Вследствие этого в настоящее время такие системы применяют для возбуждения турбо- и гидрогенераторов относительно небольшой мощности до 30–50 МВт.

Следующим шагом в развитии систем возбуждения синхронных генераторов явилось создание вентильных систем возбуждения на полупроводниковых приборах диодах или тиристорах. На рис. 5.22 приведена схема независимого тиристорного возбуждения генератора. Возбудителем в схеме служит вспомогательный синхронный генератор ($ВГ$) частотой 50 Гц, расположенный на одном валу с основным

генератором. На рис. 5.22 обозначено: 1 - обмотка якоря; 2 - обмотка возбуждения; 3 – тиристорный преобразователь генератора; 4 – контактные кольца генератора; 5 – обмотка якоря вспомогательного генератора (ВГ); 6 - - обмотка возбуждения ВГ; 7 - контактные кольца ВГ; 8 – трансформатор; 9 - тиристорный преобразователь. Переменное напряжение обмотки якоря 5 ВГ преобразует в постоянное напряжение U_f тиристорный преобразователь 3, которое через контактные кольца 4 подводит к обмотке возбуждения основного генератора.

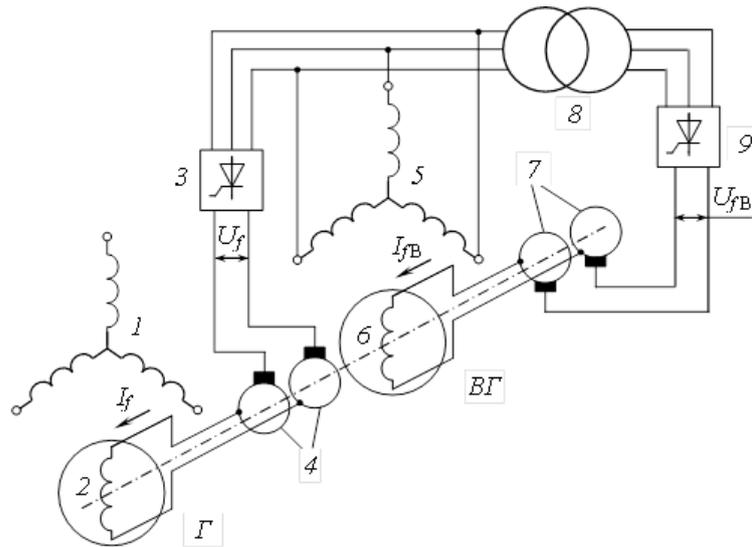


Рис. 5.22. Схема независимого тиристорного возбуждения генератора

Возбуждение ВГ осуществляется по системе тиристорного самовозбуждения от тиристорного выпрямителя 9, запитанного через трансформатор 8 от выводов обмотки якоря ВГ.

Силовая часть тиристорных преобразователей выполнена по трехфазной мостовой схеме. Схемы преобразования могут быть выполнены одногрупповыми с одним выпрямителем 3 и двухгрупповыми – с двумя выпрямителями. Схема с одной группой вентилей используется для обычной кратности форсировки $k_{fм} = 2$, а схема с двумя группами вентилей – при повышенной кратности форсировке $k_{fм} = 3-4$.

При двухгрупповой схеме один выпрямитель (форсировочный) включен на полное напряжение обмотки якоря ВГ, второй (рабочий) – на отпайку обмотки якоря, с которой снимается часть напряжения этой обмотки. На стороне постоянного тока I_f выпрямители включены параллельно и функционируют с разными углами управления. В нормальном режиме работы ток возбуждения идет в основном по рабочей

группой вентиляей, при форсировке – по форсировочной. Тиристорные преобразователи имеют низкую инерционность, что обеспечивает высокое быстродействие со скоростью нарастания напряжения возбуждения до 10–30 о.е./с.

Для гашения поля в нормальных условиях используется перевод тиристорных преобразователей в инверторный режим, а в случае аварии с помощью АГП. Наряду с рассмотренной схемой используются системы возбуждения, в которых вместо вспомогательного генератора частотой 50 Гц в качестве возбудителя используют высокочастотные синхронные индукторные генераторы на частоту 500 Гц с последующим выпрямлением напряжения. Для подобных систем характерно относительно небольшое быстродействие (до 2,0–2,5 о.е./с).

Существенным недостатком систем независимого тиристорного возбуждения можно считать наличие возбудителя переменного тока, что увеличивает стоимость системы и усложняет ее эксплуатацию.

Для исключения отмеченных недостатков разработаны системы тиристорного самовозбуждения, изображенные на рис. 5.23, которые характеризуются отсутствием электромашинного возбудителя и большей простотой, что повышает надежность системы, уменьшает ее стоимость и сокращает размеры агрегата.

В этих схемах преобразовательный трансформатор 4 включается непосредственно на линейные выводы генератора без коммутирующей аппаратуры, а тиристорные преобразователи 5 выполняют по мостовой схеме одногрупповыми при кратности форсировки $k_{fm} \leq 2,5$, при больших кратностях – двухгрупповыми. На рис. 5.23 обозначено: 1 - обмотка якоря генератора; 2 - обмотка возбуждения генератора; 3 – контактные кольца генератора; 4 – трансформатор; 5 – тиристорный преобразователь возбуждения генератора; 6 – вращающийся блок выпрямителей; 7 - обмотка якоря вспомогательного генератора (ВГ); 8 - обмотка возбуждения; 9 – подвозбудитель; 10 – тиристорный преобразователь в цепи.

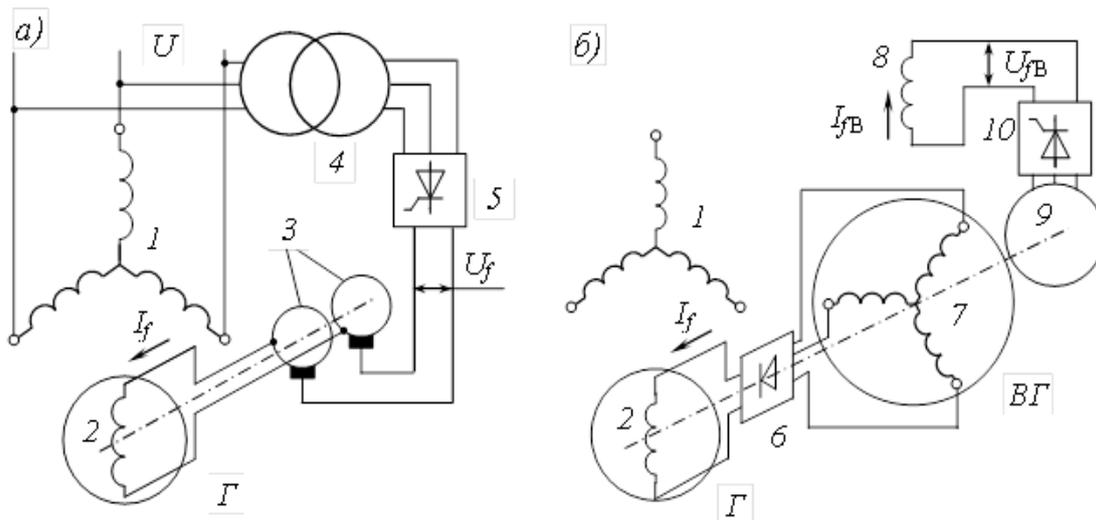


Рис. 5.23. Системы тиристорного самовозбуждения: щеточного (а); бесщеточного (б)

В схеме (а) предусмотрена возможность подачи постоянного тока в обмотку ротора генератора G от устройства начального возбуждения, которое автоматически отключается после начала процесса самовозбуждения. При этом обмотка возбуждения возбудителя получает питание от подвозбудителя через регулятор напряжения. При данном способе возбуждения в цепи питания обмотки возбуждения генератора отсутствуют скользящие контакты, что существенно повышает надежность системы возбуждения. При необходимости форсирования возбуждения генератора осуществляют повышение напряжения возбудителя и увеличение выходное напряжение выпрямителя. По своим динамическим характеристикам системы тиристорного самовозбуждения эквивалентны системам независимого тиристорного возбуждения. Существенный недостаток системы самовозбуждения (а) заключается в меньшей стабильности напряжения особенно у машин большой мощности.

Главным недостатком всех рассмотренных выше схем возбуждения является наличие скользящего контакта, снижающего надежность работы и КПД машины. Вследствие этого в настоящее время у наиболее мощных турбогенераторов с токами возбуждения $I_f = (5-10) \cdot 10^3$ А применяют бесщёточную систему возбуждения (рис. 5.23, б). В качестве возбудителя в настоящее время используют обращенный вспомогательный синхронный генератор $BГ$ с обмоткой якоря на роторе. В данной схеме переменное напряжение обмотки якоря 7 преобразуется в постоянное полупроводниковым выпрямительным блоком 6, закрепленным на валу ротора, и подводится к обмотке возбуждения 2 генератора. При этом обмотка возбуждения 8 $BГ$ размещена на статоре $BГ$ и

запитана от подвозбудителя 9, представляющего собой высокочастотный синхронный генератор.

На первом этапе вращающиеся выпрямительные блоки 6 выполняли на диодах. Однако инерционность диодных систем достаточно велика, так как постоянная времени $BГ$ обычно больше 0,5 с. С целью повышения быстродействия в цепь возбуждения $BГ$ включен тиристорный преобразователь 10 с высокой кратностью форсировки. В процессе форсировки возбуждения выпрямитель 10 открывается сигналом АРВ и напряжение U_{fB} на обмотке возбуждения 8 $BГ$ быстро возрастает. При этом ток возбуждения I_{fB} $BГ$ и напряжение на обмотке 2 ротора основного генератора тоже увеличиваются с большой скоростью (до 30 о.е./с). В настоящее время используются и вращающиеся выпрямительные блоки, выполненные на тиристорах.

К общим недостаткам бесщеточных систем возбуждения относятся увеличение длины агрегата, сложность гашения поля возбуждения и передачи управляющих импульсов к вращающимся тиристорам.

5.5. Синхронный двигатель

Синхронные двигатели конструктивно почти не отличаются от синхронных генераторов. Они также состоят из статора с обмоткой и ротора с явно выраженными полюсами, на которых находится обмотка возбуждения. Независимо от режима работы любая синхронная машина нуждается в процессе возбуждения — наведения в ней магнитного поля. Способ получения магнитного поля синхронных машин рассматривался выше при описании принципа работы синхронных генераторов. В Достоинством синхронных двигателей является высокие технико экономические показатели: высокий коэффициент мощности — более 0,8; в синхронных двигателях возможно регулирование перегрузочной способности посредством регулирования тока возбуждения, причем она меньше зависит от напряжения сети, чем в асинхронном двигателе. Недостатком следует считать сложность с обеспечением пуска синхронного электродвигателя. При неподвижном роторе и подключении обмотки статора к сети переменного тока, а обмотки возбуждения к источнику постоянного тока, из-за постоянно изменяющихся взаимных направлений магнитных полей статора и ротора синхронный двигатель будет развивать не постоянный по направлению, а знакопеременный вращающий момент и, следовательно, не сможет разогнаться до синхронной скорости без применения специальных мер по

его запуску. Применяются несколько способов пуска: с использованием вспомогательного двигателя постоянного тока, который разгоняет ротор ненагруженного синхронного двигателя до синхронной скорости, после чего осуществляется его синхронизация с сетью; с помощью асинхронного пуска, для реализации которого на роторе двигателя укладывается дополнительная пусковая обмотка, выполненная аналогично короткозамкнутой обмотке асинхронного двигателя. Торможение синхронного двигателя осуществляется переводом его в генераторный режим. Ранее синхронные двигатели применялись в приводах с нерегулируемой скоростью. Появление статических преобразователей частоты позволило применять синхронные двигатели в приводах с регулировкой скорости. В настоящее время применяются вентильные синхронные двигатели с электронным коммутатором напряжения, к которому подключена обмотка статора, и датчиком положения ротора, установленным на валу двигателя и управляющим работой коммутатора в зависимости от положения ротора. Датчик положения генерирует периодические сигналы, по которым открываются и закрываются ключи коммутатора, подключающего к сети соответствующие полюсы статора. В результате этого магнитное поле статора вращается с той же скоростью, что и ротор. На рис. 5.24 представлен принцип действия синхронного двигателя с электронным коммутатором. Ротор 4 электродвигателя (на рисунке представлен в виде постоянного магнита) имеет датчик положения вала 8, который подает управляющие сигналы на коммутатор. Коммутатор выполнен на четырех управляемых ключах 7, 2 и 6, 7 и связан с источником постоянного напряжения U . Обмотка статора на схеме, для упрощения анализа, представлена двумя проводниками 3 и 5 в виде рамки. По сигналам датчика положения ротора с помощью управляемых ключей происходит коммутация тока в обмотке статора, чем обеспечивается постоянное направление вращающего момента двигателя при любой скорости его вращения. Для протекания тока по проводникам 3 и 5 в указанном на рисунке направлении должны быть замкнуты ключи 1 и 6. В результате взаимодействия магнитного поля ротора с током I в проводниках 3 и 5 на ротор будет действовать вращающий момент, поворачивающий его в соответствии с правилом левой руки по часовой стрелке.

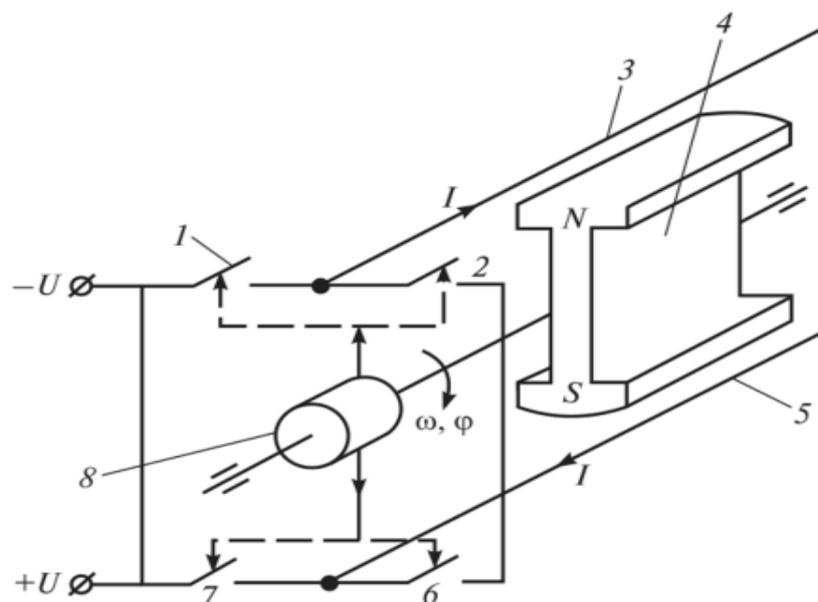


Рис. 5.24. Принцип действия синхронного двигателя с электронным коммутатором

После поворота ротора на 180° по сигналу датчика 3 и 5 изменяется на противоположное (ключи 7 и 6 размыкаются, а 2 и 7 замыкаются) и направление действия вращающего момента сохранится. Коммутатор представляет собой управляемый инвертор, который может питаться непосредственно от источника постоянного тока или от управляемого выпрямителя. Таким образом, принцип работы синхронного двигателя аналогичен принципу работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения и механические характеристики двигателей схожи. Однако механическая характеристика синхронного двигателя параллельна оси абсцисс и является практически абсолютно жесткой в силу того, что ротор вращается с той же частотой, что и поле статора. На рис. 5.25 приведены типовые рабочие характеристики синхронного двигателя, т.е. зависимости M_2 , P_1 , I_b , I_1 и η от P_2 при условии, что $U_1 = \text{const}$, $I_2 = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$. Зависимость нагрузочного момента на валу M_2 от полезной мощности P_2 имеет линейный характер, так как угловая скорость ротора $\omega = \text{const}$ ($M_2 = P_2/\omega$). Для поддержания $\cos \varphi = \text{const}$ с увеличением нагрузки ток возбуждения I_b следует увеличивать. При холостом ходе ($P_2 = 0$) двигатель потребляет из сети мощность, необходимую для покрытия потерь (механических и магнитных) внутри машины.

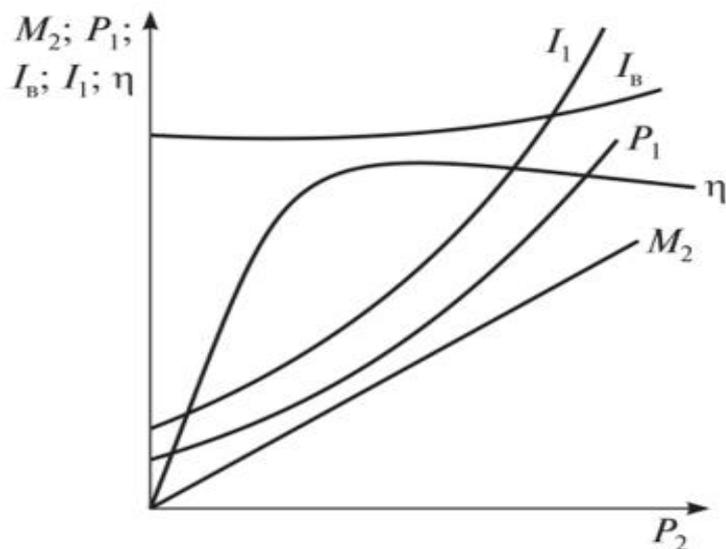


Рис. 5.25. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Поэтому при холостом ходе ток статора не равен нулю. С возрастанием P_2 увеличивается P_1 , так как она включает в себя как потери холостого хода, так и электрические потери в обмотке якоря; возрастает и ток I_1 . Кривая зависимости КПД от P_2 имеет обычный характер. Максимальное значение КПД имеет место при мощностях меньше номинальной.

Вопросы для самопроверки к главе 5:

1. Как происходит процесс преобразования энергии в электрических машинах переменного тока?
2. Как работает типовая машина переменного тока?
3. Как выполняется пазовая изоляция в машинах переменного тока?
4. Назовите достоинства и недостатки электрических машин переменного тока.
5. Назовите основные детали и узлы машины переменного тока.
6. Чем отличаются короткозамкнутый и фазный роторы?
7. Чем отличаются явнополюсный и неявнополюсный роторы?
8. За счет чего реализуется вращение магнитного поля в машине переменного тока?
9. Назовите необходимые и достаточные условия создания вращающегося магнитного поля в машине переменного тока.
10. Объясните принцип работы асинхронного двигателя.
11. Что показывает внешняя характеристика генератора постоянного тока?

12. Что называется скольжением в асинхронной машине?
13. Чем отличается скольжение в асинхронном двигателе и асинхронном генераторе?
14. Какое скольжение в асинхронной машине называется критическим?
15. Какие характеристики асинхронного двигателя называют рабочими?
16. Как устроен классический синхронный генератор?
17. Опишите работу классического синхронного генератора
18. Как работает синхронный генератор с постоянными магнитами?
19. Перечислите виды исполнения ротора синхронных генераторов.
20. Приведите классификацию систем возбуждения синхронных генераторов.
21. Какие источники возбуждения применяются в синхронных генераторах?
22. Что называется системой прямого компаундирования в синхронном генераторе?
23. Что называется электромашинным возбуждением генератора?
24. Что называется тиристорным возбуждением генератора?
25. Назовите достоинства и недостатки щеточного и бесщеточного возбуждения синхронных генераторов.
26. Объясните принцип действия синхронного двигателя с электронным коммутатором.
27. Какие характеристики синхронного двигателя называют рабочими?

Практические задания к главе 5

Задание П5.1 Приобрести практические навыки в сборке схемы и регулировке асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах асинхронных исполнительных двигателей при указанных способах управления.

Подготовка к выполнению задания.

1. Повторить теоретический материал: назначение асинхронных исполнительных двигателей и способы их управления; самоход и пути

его устранения; асинхронный исполнительный двигатель с полым немагнитным ротором; механические и регулировочные характеристики двигателя при различных способах управления; зависимость полезной механической мощности асинхронного исполнительного двигателя от частоты вращения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

Порядок выполнения задания

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя, записать его паспортные данные, данные измерительных приборов и регуляторов напряжения.

2. Собрать схему по рис. 5.1 и после проверки ее преподавателем, произвести пробный пуск двигателя и его реверсирование; проверить отсутствие самохода и измерить напряжение трогания.

Снять данные и построить механические характеристики двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления двигателем; определить нелинейность механических характеристик.

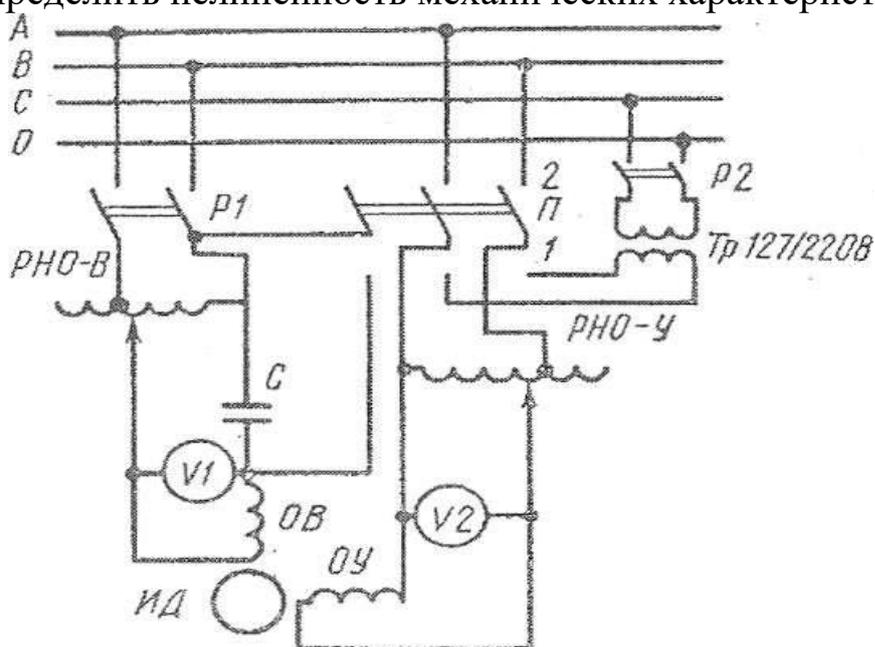


Рис. П5.1. Схема включения двигателя

3. Снять данные и построить регулировочные характеристики двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления; определить нелинейность регулировочных характеристик.

4. Используя данные двигателя, полученные в п. 3, рассчитать параметры и построить графики зависимости полезной мощности двигателя от частоты вращения.

Основные сведения.

Асинхронные исполнительные двигатели применяются в устройствах автоматики и вычислительной техники в качестве исполнительного органа, т.е. для преобразования электрических сигналов в механическое перемещение вала.

На статоре исполнительного двигателя (ИД) имеются две обмотки, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Одну обмотку называют обмоткой возбуждения (ОВ), она постоянно находится под напряжением, на другую, называемую обмоткой управления (ОУ), напряжение (электрический сигнал) подается лишь при необходимости вызвать вращение вала двигателя.

Величина вращающего момента, развиваемого асинхронным исполнительным двигателем, зависит от величины напряжения (напряжения управления) U_y , поданного на обмотку управления, и его фазового сдвига β относительно напряжения на обмотке возбуждения.

Существует три способа управления асинхронными исполнительными двигателями:

- изменением величины (амплитуды) напряжения управления U_y при неизменной его фазе β ($U_y = \text{var}$; $\beta = \text{const}$) — амплитудное управление;
- изменением фазы напряжения управления (β при неизменной его величине ($U_y = \text{const}$; $\beta = \text{var}$) — фазовое управление;
- одновременным изменением величины (амплитуды) напряжения управления и его фазы ($U_y = \text{var}$; $\beta = \text{var}$) — амплитудно-фазовое управление.

Наибольшее практическое применение получили два способа управления — амплитудное и амплитудно-фазовое. Эти способы управления исследуются в данной лабораторной работе.

Помимо общих требований ко всем электрическим машинам (минимальные габариты, масса и стоимость, высокий КПД и т. д.) к асинхронным исполнительным двигателям предъявляются некоторые специфические требования: широкий диапазон регулирования частоты вращения, отсутствие самохода, малоинерционность, прямолинейность механических и регулировочных характеристик. Последнее требование в асинхронном ИД полностью не может быть выполнено, т.е. характеристики этого двигателя всегда отличаются от прямолинейных,

поэтому при оценке свойств асинхронного исполнительного двигателя вводят понятие «нелинейность характеристики».

Нелинейность механической характеристики (%)

$$\Delta m = (DB / AB) \times 100 \quad (\text{П } 5.1)$$

Для определения отрезков DB и AB (рис. 5.2, а) проводят прямую, соединяющую точки пересечения механической характеристики с осями координат, а затем параллельно этой прямой проводят касательную к механической характеристике и получают точку B . Из этой точки опускают перпендикуляр BA на ось абсцисс и получают искомые отрезки DB и AB . *Нелинейность регулировочной характеристики Δv* определяют по выражению, аналогичному (5.1)

$$\Delta v = (DB / AB) \times 100 \quad (\text{П } 5.2)$$

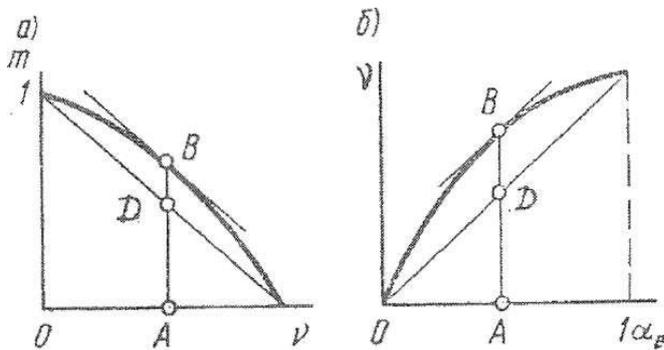


Рис. П5.2. Определение нелинейности механической (а) и регулировочной (б) характеристик

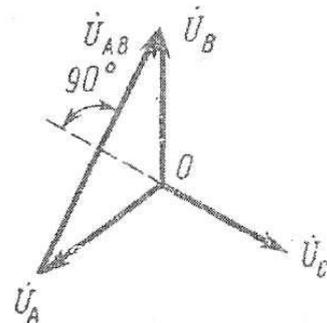


Рис. П5.3. Векторная диаграмма напряжений трехфазной сети с нулевым проводом

Известно, что для получения в двухфазном двигателе вращающегося магнитного поля необходим фазовый сдвиг между токами в обмотке возбуждения ОВ и в обмотке управления ОУ. При пространственном сдвиге осей этих обмоток в 90 эл. град. желательно, чтобы фазовый сдвиг между токами составлял $\beta=90^\circ$.

При амплитудном способе управления исполнительным двигателем это достигается тем, что обмотки статора включают на напряжения, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 90° . Для получения таких напряжений существует несколько способов. Наиболее простой — воспользоваться трехфазной сетью с нулевым проводом. При этом цепь обмотки ОВ подключают к линейным проводам А и В на напря-

жение U_{AB} , а цепь обмотки ОУ к линейному проводу С и нулевому проводу О на фазное напряжение U_C (см. рис. 5.1). Фазовый сдвиг между векторами этих напряжений составляет 90° (рис. 5.3). При амплитудно-фазовом способе управления ИД сдвиг по фазе между напряжениями U_B и U_Y создается конденсатором С в цепи обмотки ОВ (см. рис. П5.1). Емкость этого конденсатора в асинхронном ИД выбирается такой, чтобы обеспечить фазовый сдвиг $\beta = 90^\circ$ при пуске двигателя. При этом следует помнить, что при других режимах работы двигателя фазовый сдвиг $\beta \neq 0^\circ$.

Схема соединений. На рис. П 5.1 представлена схема включения асинхронного исполнительного двигателя. В схеме применены два однофазных регулировочных автотрансформатора (РНО-В и РНО-У), позволяющие осуществлять независимую регулировку напряжения как в цепи ОВ, так и в цепи ОУ.

Переключение ИД с амплитудного управления на амплитудно-фазовое осуществляется переключателем П: положение 1 этого переключателя соответствует амплитудному управлению двигателя (конденсатор С зашунтирован, а цепь управления подключена на фазное напряжение U_C); при положении 2 переключателя управление двигателя амплитудно-фазовое (цепь управления подключена параллельно цепи возбуждения на линейное напряжение U_{AB} , а последовательно обмотке возбуждения включен конденсатор С).

Для получения одинаковых напряжений на входах РНО-В и РНО-У в схему включают повышающий трансформатор Тр, увеличивающий фазное напряжение U_C в $\sqrt{3}$ раз. Во время выполнения работы рубильник Р2 должен быть включенным.

Собирают схему по рис. П5.1 и после проверки ее преподавателем осуществляют пробный пуск двигателя. Для этого рукоятки регуляторов РНО-В и РНО-У ставят в положение минимального напряжения, включают рубильники Р1 и Р2, а переключатель П ставят в положение 1 (амплитудное управление). Затем регулятором РНО-В устанавливают номинальное напряжение на обмотке возбуждения U_B (вольтметр V1), а напряжение управления U_Y (вольтметр V2) постепенно повышают регулятором РНО-У до номинального значения, наблюдая за нарастающей частотой вращения ИД. После этого, вернув рукоятки РНО-У и РНО-В в нулевое положение, переключатель П переводят в положение 2 (амплитудно-фазовое управление), устанавливают регулятором РНО-В номинальное напряжение U_B и постепенно повышают напряжение управления U_Y .

Для изменения направления вращения двигателя (реверса) следует поставить переключатель П в нейтральное положение, поменять местами провода, присоединяемые к выводам обмотки управления, и включить двигатель, поставив переключатель П в положение 1 или 2.

Проверка отсутствия самохода и определение напряжения трогания ИД. Для проверки отсутствия технологического самохода, вызванного возможным коротким замыканием части витков в обмотках статора, асимметрией магнитной системы двигателя или замыканием некоторой части пластин магнитопровода, включают в сеть обмотку возбуждения (ОВ) двигателя, установив на ней номинальное напряжение. Обмотка управления (ОУ) при этом должна быть отключенной (переключатель И находится в нейтральном положении). Если при этом ротор ИД остается неподвижным, то это свидетельствует об отсутствии технологического самохода. Затем проверяют отсутствие в двигателе параметрического самохода, обусловленного недостаточным активным сопротивлением ротора. С этой целью включают в сеть обе обмотки статора и с помощью РНО-В и РНО - У устанавливают номинальные напряжения на обмотках возбуждения и управления и после достижения двигателем установившейся частоты вращения регулятором РНО- У уменьшают до нуля напряжение управления. При этом ротор двигателя должен остановиться (параметрический самоход отсутствует).

Под напряжением трогания понимают такое минимальное напряжение в цепи обмотки управления ($U_{y.тр}$), при котором ротор двигателя начинает вращаться. Напряжение на обмотке возбуждения при этом должно быть номинальным. Опыт проводят в следующем порядке. Включив рубильник Р1 и поставив переключатель П в положение 1 (амплитудное управление), устанавливают с помощью РНО-В номинальное напряжение возбуждения и регулятором РНО-У постепенно повышают напряжение на ОУ от нуля до некоторого значения $U_{y.тр}$, при котором начнется вращение ротора двигателя. Так как обычно величина напряжения трогания невелика, то при этом опыте применяют вольтметр V2 с небольшим пределом измерения — не более (0,10—0,15) $U_{y.ном}$. Для получения более точного результата опыт повторяют три раза, результаты измерений заносят в табл. П 5.1 и определяют среднее значение напряжения трогания (В)

$$U_{y.тр.ср} = (U_{y.тр1} + U_{y.тр2} + U_{y.тр3}) / 3. \quad (П5.3)$$

Затем переключатель П ставят в положение 2 (амплитудно-фазовое управление) и опыт повторяют.

Таблица П5.1

Способ управления	$U_{y.mp1}, B$	$U_{y.mp2}, B$	$U_{y.mp3}, B$	$U_{y.mp.cp}, B$
Амплитудное				
Амплитудно-фазовое				

Механические характеристики. Данные, необходимые для построения механических характеристик ИД, снимают следующим образом. Включают двигатель в сеть при амплитудном способе управления (переключатель П ставят в положение 1), устанавливают номинальные напряжения на обмотках ОВ и ОУ и посредством тормозного устройства (электромагнитного или маятникового тормоза) затормаживают ротор двигателя. При этом измеряют начальный пусковой момент $M_{п}$ при $n_2 = 0$. Затем постепенно уменьшают величину нагрузочного момента до режима х. х. ($M_2 = 0$) и через приблизительно одинаковые интервалы этого момента измеряют частоту вращения двигателя П2. Всего делают не менее пяти измерений и показания приборов заносят в табл. П5.2.

Таблица П5.2

Способ управления	Амплитудное					Амплитудно-фазовое				
	$M_2, Нм$									
$n_2, об/мин$										
m										
v										

Затем переключатель П переводят в положение 2 и в таком же порядке снимают данные механической характеристики при амплитудно-фазовом способе управления ИД.

Полученные опытным путем данные момента и частоты вращения пересчитывают в относительных единицах:

$$m = M_2 / M_{п}; \quad (П5.4)$$

$$v = n_2 / n_1, \quad ,$$

где $M_{п}$ – начальный пусковой момент, Н×м; синхронная частота вращения, об/мин:

$$n_1 = f_1 60 / p, \quad (П5.5)$$

где p — число пар полюсов в обмотках статора.

Полученные относительные значения величин заносят в табл. 5.2 и строят механические характеристики асинхронного исполнительного двигателя $m = f(v)$ при номинальном напряжении управления, а затем определяют их нелинейность Δm .

Регулировочные характеристики. Данные, необходимые для построения регулировочных характеристик ИД при амплитудном управлении, снимают в режиме х. х. ($M_2 = 0$), поставив переключатель П в положение 1. Для этого устанавливают в цепи возбуждения номинальное напряжение возбуждения U_B и с помощью РНО-У постепенно повышают напряжение управления U_y от нуля до номинального значения. Одновременно измеряют частоту вращения двигателя n_2 . Всего делают не менее пяти замеров приблизительно через одинаковые интервалы напряжения управления и заносят их в табл. П5.3.

Таблица П5.3

Способ управления	Амплитудное					Амплитудно-фазовое				
M_2 , Нм										
n_2 , об/мин										
m										
v										

Затем переключатель П ставят в положение 2 и в таком же порядке снимают данные для построения регулировочных характеристик при амплитудно-фазовом управлении ИД.

Затем переключатель П ставят в положение 2 и в таком же порядке снимают данные для построения регулировочных характеристик при амплитудно-фазовом управлении ИД.

Относительное значение эффективного коэффициента сигнала

$$a_c = kU_y / U_B, \quad (\text{П5.6}),$$

где k — коэффициент трансформации обмоток возбуждения и управления (его величина указана в паспортных данных двигателях). Относительную частоту вращения определяют по (П5.4).

По полученным значениям относительных величин строят регулировочные характеристики двигателя $v = f(a_c)$ и определяют их нелинейность Δv .

Зависимость полезной механической мощности двигателя от частоты вращения. Используя данные, приведенные в табл. 5.2, определяют полезную механическую мощность двигателя (Вт)

$$P_2 = 0,105M_2n_2, \quad (\text{П } 5.8)$$

Результаты вычислений заносят в табл. 5.4

Таблица П5.4

Способ управления	Амплитудное					Амплитудно-фазовое			
	v								
$p_2, \text{Вт}$									

Анализ результатов выполнения задания

Анализ результатов лабораторной работы состоит главным образом в сравнении свойств асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления. При этом сравнивают следующие параметры: напряжение трогания, начальный пусковой момент, нелинейность механических и регулировочных характеристик, наибольшее значение полезной механической мощности. Для удобства сравнения перечисленных параметров следует заполнить табл. П5.5.

Отмечая достоинства или недостатки способа управления по какому-либо параметру, необходимо физически обосновать пояснение. При окончательной оценке преимуществ того или иного способа управления асинхронным исполнительным двигателем необходимо также иметь в виду сложность схемы соединений и наличие в ней дополнительных устройств.

Таблица П5.5

Способ управления	$U_{тр}, \text{В}$	$M_{п}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\Delta m, \%$	$\Delta v, \%$	$P_{2наиб.}, \text{Вт}$
Амплитудное					
Амплитудно- фазовое					

Вопросы для самопроверки:

1. Каково назначение исполнительных двигателей?
2. Какие существуют способы управления асинхронными исполнительными двигателями и по каким принципиальным схемам они реализуются?
3. Какие виды самохода возможны в асинхронном ИД?

4. С какой целью асинхронные ИД выполняют с повышенным активным сопротивлением ротора?
5. Как устроен асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором?
6. Объясните устройство асинхронного двигателя «сквозной» конструкции.
7. Что такое напряжение трогания и как его определить?
8. Из каких соображений выбирают величину емкости конденсатора в цепи обмотки возбуждения при амплитудно-фазовом управлении асинхронным ИД?
9. Какие величины принимаются за базовые при расчете относительного значения момента и относительной частоты вращения?

Глава 6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

6.1. Шаговый двигатель

Шаговые двигатели (ШД) относятся к классу бесколлекторных синхронных двигателей с питанием обмотки статора импульсами тока. Одним из главных преимуществ ШД является возможность осуществлять точное позиционирование и регулировку скорости и величины перемещения без датчика обратной связи. Это очень важно, так как такие датчики могут стоить намного больше самого двигателя. Конструктивно ШД исполняются с явно- и неявнополюсным статором, на котором расположены обмотки возбуждения, и с ротором без обмотки, выполненным из магнитно-мягкого (реактивный ротор), или из магнитно-жесткого (активный ротор) материала. ШД с активным ротором позволяют получать большой вращающий момент и обеспечивают фиксацию положения ротора при обесточенных обмотках. В ШД импульсы тока через коммутатор поступают поочередно в обмотки статора, в результате чего ориентация магнитного потока в пространстве между полюсами статора и ротором дискретно меняется и вызывает поворот ротора на некоторый угол, называемый шагом ротора. Конструктивно ШД выполняются с переменным магнитным сопротивлением, с постоянными магнитами, гибридные двигатели, биполярные и униполярные шаговые двигатели.

ШД с переменным магнитным сопротивлением (рис. 6.1) имеют несколько полюсов на статоре 1 и ротор 2 зубчатой формы из магнитно-мягкого материала.

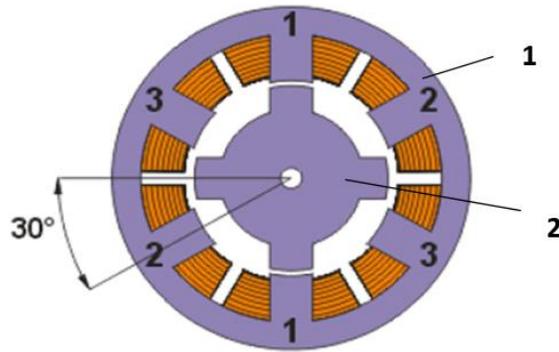


Рис. 6.1. ШД с переменным магнитным сопротивлением

Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты на рис.6.1 ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг 30 град. При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять положение, когда магнитный поток замкнут, т.е. зубцы ротора будут находиться напротив тех полюсов, на которых находится запитанная обмотка. Если затем выключить эту обмотку и включить следующую, то ротор поменяет положение, снова замкнув своими зубцами магнитный поток. Таким образом, чтобы осуществить непрерывное вращение, нужно включать фазы попеременно. Двигатель не чувствителен к направлению тока в обмотках. Реальный двигатель может иметь большее количество полюсов статора и большее количество зубцов ротора, что соответствует большему количеству шагов на оборот. Иногда поверхность каждого полюса статора выполняют зубчатой, что вместе с соответствующими зубцами ротора обеспечивает очень маленькое значения угла шага, порядка нескольких градусов.

ШД с постоянными магнитами (Рис.6.2) состоят из статора 1, который имеет обмотки, и ротора 2, содержащего постоянные магниты.

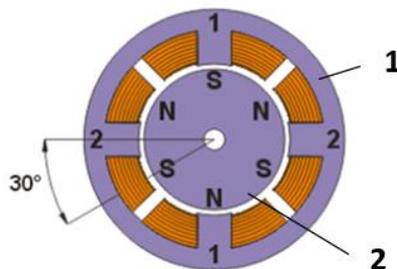


Рис. 6.2. ШД с постоянными магнитами

Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается большой магнитный поток и, как следствие, больший момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением. Показанный на рис. 6.2 двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полюсов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель, как и рассмотренный ранее двигатель с переменным магнитным сопротивлением, имеет величину шага 30 град. При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно. На практике двигатели с постоянными магнитами обычно имеют 48 – 24 шага на оборот (угол шага 7.5 – 15 град). На рис.6.3 приведен разрез двухобмоточного ШД с постоянными магнитами. Внутри находятся полюсные наконечники в виде ламелей. Обмотки фаз размещены на двух разных магнитопроводах, которые установлены друг на друге. Ротор представляет собой цилиндрический многополюсный постоянный магнит. Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Гибридные двигатели являются более дорогими, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага 3.6 – 0.9 град.). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами.

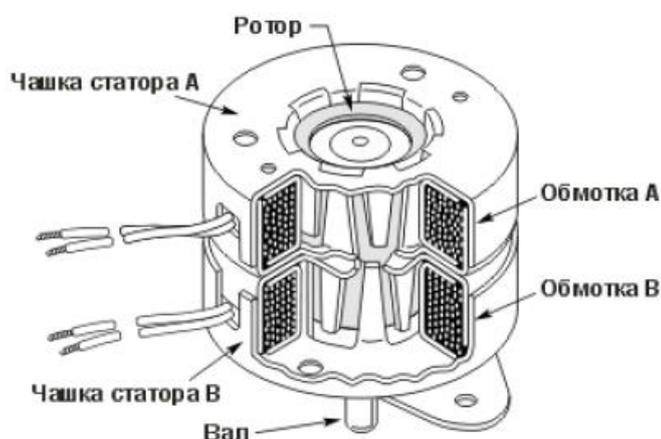


Рис. 6.3. Разрез двухобмоточного ШД с постоянными магнитами

Ротор 2 гибридного двигателя (Рис.6.4, а, б) разделен на две части и имеет зубцы различной полярности, расположенные в осевом направлении как показано на рис.6.4,б. Ротор 2 разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, зубцы верхней половины ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половины – южными.

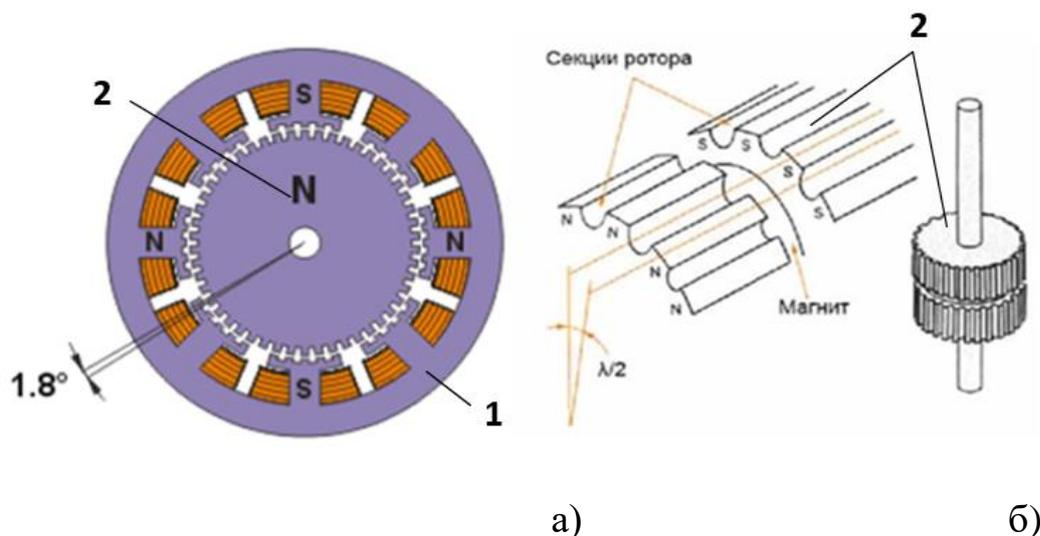


Рис. 6.4. Устройство гибридного ШД

Статор 1 гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для 3.6 град. двигателей и 8 основных полюсов для 1.8 и 0.9 град. двигателей. Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент. Это обеспечивается соответствующим расположением зубцов, когда часть зубцов ротора находится строго напротив зубцов статора, а часть между ними. Зависимость между числом полюсов ротора, числом эквивалентных полюсов статора и числом фаз определяет угол шага α двигателя:

$$\alpha = 360/N_p \cdot m = 360/P, \quad (6.1)$$

где N_p – число эквивалентных полюсов на фазу, равное числу полюсов ротора, m – число фаз, P - полное количество полюсов для всех фаз вместе. Ротор показанного на рис. 6.4 двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет 2 фазы, поэтому полное количество полюсов

– 200, а шаг, соответственно, 1.8 град. Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными. По сути, гибридный двигатель является двигателем с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот, соответственно шаг равен 3.6 град или 1.8 град.

В зависимости от конфигурации обмоток ШД делятся на биполярные и униполярные и четырехобмоточные (Рис.6.5).

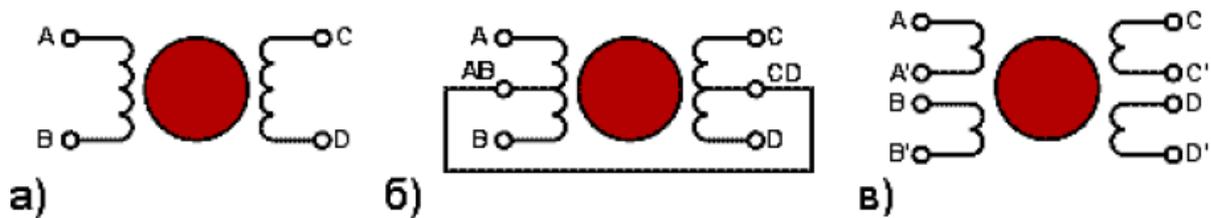


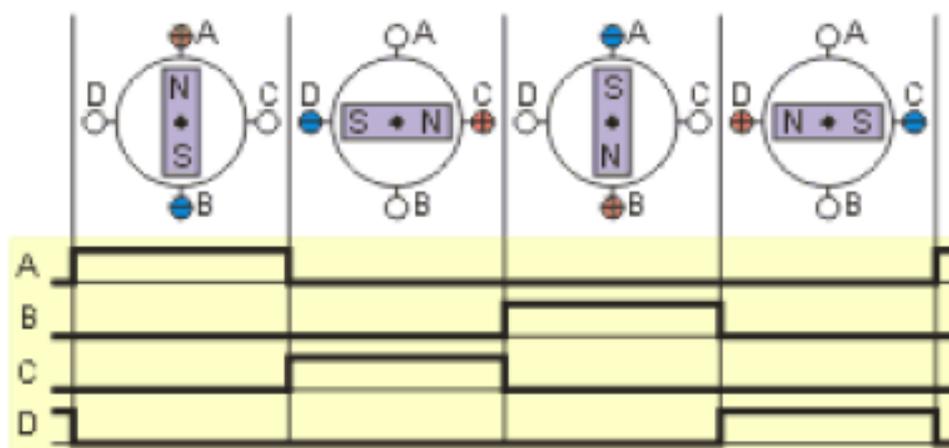
Рис. 6.5. Исполнение обмоток ШД

Биполярный двигатель (рис.6.5, а) имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна переполюсовывается драйвером. Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода. Униполярный двигатель (Рис.6.5, б) также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема драйвера. Драйвер должен иметь только 4 простых ключа. Таким образом, в униполярном двигателе используется другой способ изменения направления магнитного поля. Средние выводы обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов. Иногда униполярные двигатели имеют отдельные 4 обмотки (Рис.6.5, в), по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8. При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами тоже можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности.

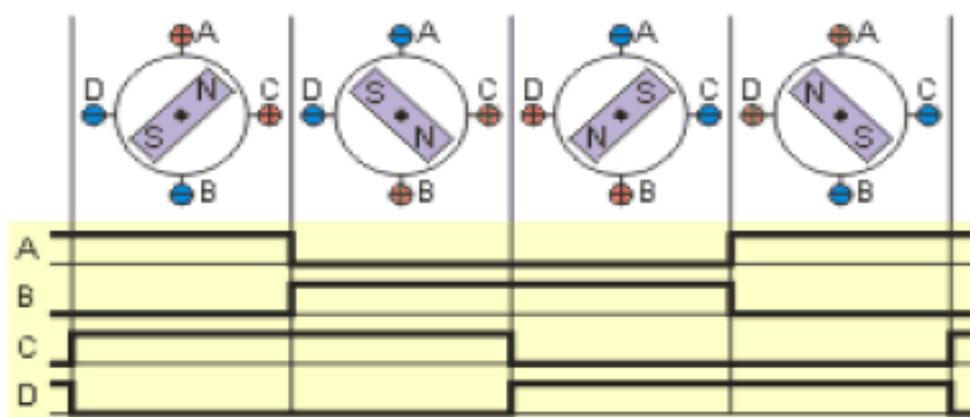
Существует три способа управления фазами шагового двигателя: полношаговый режим; полушаговый режим; микрошаговый режим. Первый способ обеспечивается попеременной коммутации фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 6.6, а). Этот способ называют "one phase on" full step или wave drive mode. Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с «естественными» точками равновесия ротора у незапитанного двигателя. Недостатком этого способа управления является то, что для биполярного двигателя в один и тот же момент времени используется 50% обмоток, а для униполярного – только 25%. Это означает, что в таком режиме не может быть получен полный момент. Второй способ - управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. Его называют "two-phase-on" full step или просто full step mode. При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рис. 6.6, б) и обеспечивается примерно на 40% больший момент, чем в случае одной включенной фазы. Этот способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый способ, но положение точек равновесия ротора смещено на полшага.

В полношаговом режиме с двумя включенными фазами положения точек равновесия ротора смещены на полшага. Нужно отметить, что эти положения ротор принимает при работе двигателя, но положение ротора не может сохраняться неизменным после выключения тока обмоток. Поэтому при включении и выключении питания двигателя ротор будет смещаться на полшага. Для того, чтобы он не смещался при остановке, необходимо подавать в обмотки ток удержания. То же справедливо и для полушагового и микрошагового режимов. Следует отметить, что если в выключенном состоянии ротор двигателя поворачивался, то при включении питания возможно смещение ротора и на большую, чем половина шага величину. Ток удержания может быть меньше номинального, так как от двигателя с неподвижным ротором обычно не требуется большого момента. Однако есть применения, когда в остановленном состоянии двигатель должен обеспечивать полный момент, что для шагового двигателя возможно. Это свойство шагового двигателя позволяет в таких ситуациях обходиться без механических тормозных систем. Поскольку современные драйверы позволяют регулировать ток питания обмоток дви-

гателя, задание необходимого тока удержания обычно не представляет проблем. Задача обычно заключается просто в соответствующей программной поддержке для управляющего микроконтроллера.



а) полношаговый режим, включена одна фаза, "one phase on" full step (wave drive mode)



б) полношаговый режим, включены две фазы, "two-phase-on" full step (full step mode)

Рис. 6.6. Способы управления фазами шагового двигателя

Полушаговый режим - комбинация пошаговых, "one and two-phase-on" half step или просто half step mode, когда двигатель делает шаг в половину основного. Этот метод управления достаточно распространен, так как двигатель с меньшим шагом стоит дороже и очень заманчиво получить от 100-шагового двигателя 200 шагов на оборот. Каждый второй шаг запитана лишь одна фаза, а в остальных случаях за-

питаны две. В результате угловое перемещение ротора составляет половину угла шага для первых двух способов управления. Кроме уменьшения размера шага этот способ управления позволяет частично избавиться от явления резонанса. Полушаговый режим обычно не позволяет получить полный момент, хотя наиболее совершенные драйверы реализуют модифицированный полушаговый режим, в котором двигатель обеспечивает практически полный момент, при этом рассеиваемая мощность не превышает номинальной.

Микрошаговый режим обеспечивается путем получения поля статора, вращающегося более плавно, чем в полно- или полушаговом режиме. В результате обеспечиваются меньшие вибрации и практически бесшумная работа вплоть до нулевой частоты. К тому же меньший угол шага способен обеспечить более точное позиционирование. Существует много различных микрошаговых режимов, с величиной шага от $1/3$ полного шага до $1/32$ и даже меньше. Шаговый двигатель является синхронным электродвигателем. Это значит, что положение равновесия неподвижного ротора совпадает с направлением магнитного поля статора. При повороте поля статора ротор тоже поворачивается, стремясь занять новое положение равновесия. Чтобы получить нужное направление магнитного поля, необходимо выбрать не только правильное направление токов в катушках, но и правильное соотношение этих токов. Смещение точки равновесия ротора говорит о том, что ротор можно зафиксировать в любой произвольной позиции. Для этого нужно лишь правильно установить отношение токов в фазах. Этот факт используется при реализации микрошагового режима. В пределе, шаговый двигатель может работать как синхронный электродвигатель в режиме непрерывного вращения. Для этого токи его фаз должны быть синусоидальными, сдвинутыми друг относительно друга на 90 град.

6.2. Гистерезисный двигатель

Принцип действия гистерезисного двигателя основан на явлении магнитного гистерезиса материала ротора. Магнитный гистерезис - это явление зависимости вектора напряженности и вектора намагничивания магнитного поля в веществе не только от воздействия внешнего магнитного поля, но и от предыстории воздействия. Если графически нанести намагничивание в зависимости от величины и направления поля, то получается так называемая “гистерезисная петля” - отставание

процесса размагничивания (или перемагничивания) магнитного материала образца от внешнего магнитного поля (рис. 6.7).

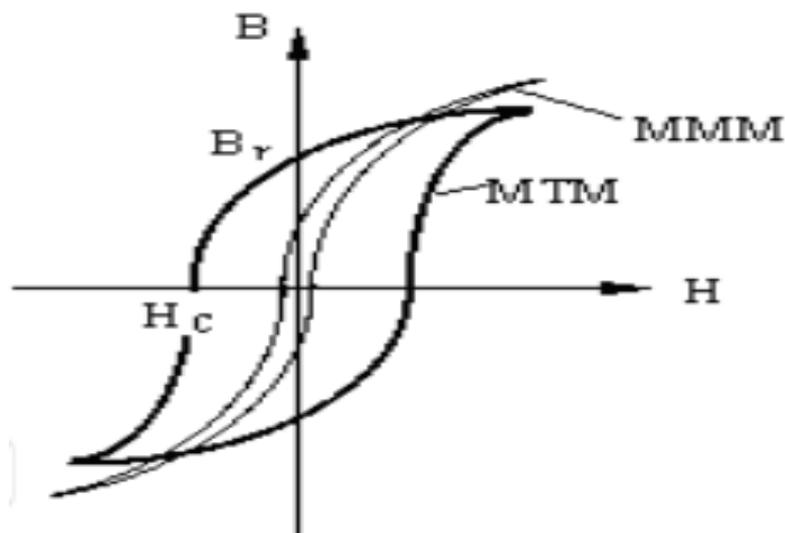


Рис. 6.7. Вид петли магнитного гистерезиса

Очевидно, что процесс намагничивания всегда связан с затратой энергии. В случае гистерезиса намагничивание необратимо, и потому прохождение цикла гистерезиса связано с потерей энергии — образец нагревается. Размер потерянной энергии определяется площадью гистерезисной петли. В совершенно чистых и однородных (отожженных) кристаллах железа и никеля гистерезис отсутствует. Напротив, он резко выражен в образцах, состоящих из большого числа мелких спрессованных кристалликов, у многих сплавов железа, кобальта, никеля, у некоторых минералов, содержащих железо (магнитный железняк и пр.). В зависимости от ширины петли гистерезиса различают магнитомягкие материалы (МММ) и магнитотвердые материалы (МТМ) с узкой и широкой петлей гистерезиса соответственно. Статор гистерезисного двигателя подобен статору обычной машины переменного тока. Ротор представляет собой стальной цилиндр из магнитотвердого материала без обмотки. С целью удешевления ротор делают сборным: кольцо из ферромагнитного материала и немагнитная или магнитомягкая втулка. Так как ротор выполнен из магнитотвердого материала, то элементарные магнетики перемагничиваются не мгновенно, а с отставанием из-за гистерезиса, это и создает гистерезисный момент. Условно представим поле статора в виде двух постоянных магнитов N и S (рис. 6.8). При расположении полюсов статора как показано на рис.

6.8, а они намагнитят ротор и между полюсами статора и ротором возникнут две взаимно уравновешенные силы F_m , действующие по оси ротора.

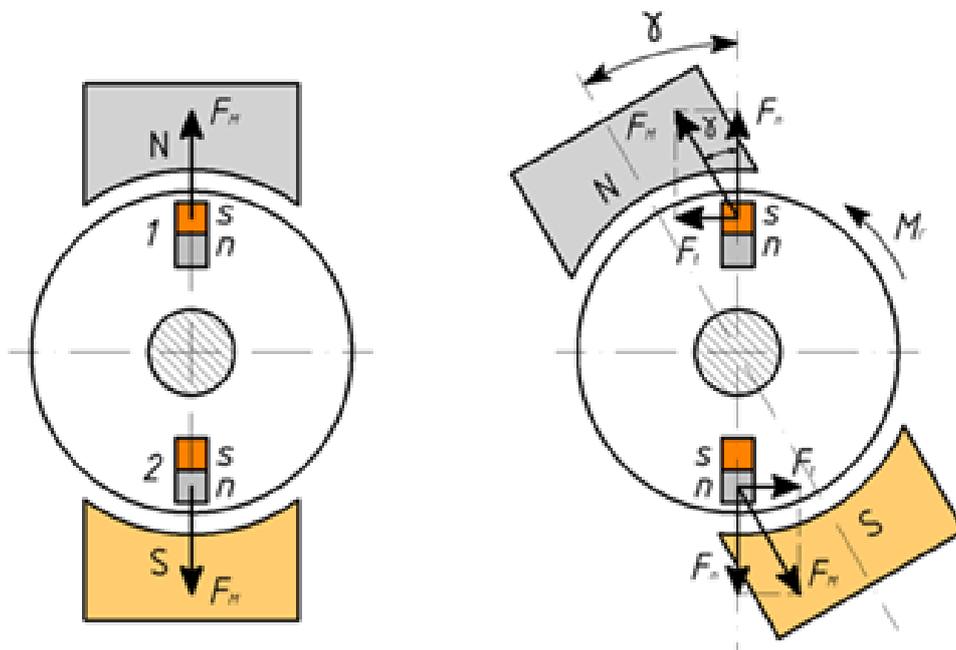


Рис. 6.8. Принцип работы гистерезисного двигателя

При повороте поля статора на некоторый угол γ (Рис.6.8, б) силы F_m вследствие магнитного гистерезиса не будут действовать по оси ротора и их можно разложить на нормальные составляющие F_n , действующие по оси ротора, и тангенциальные составляющие F_t , создающие вращающий гистерезисный момент M_h . Величина силы F_t и создаваемый ею момент не зависят от скорости вращения, а определяются шириной петли гистерезиса ферромагнитного материала. Если нагрузочный момент больше M_h , то двигатель перейдет в асинхронный режим работы, т.е. появится дополнительный асинхронный момент M_a . Движущий момент ротора создается двумя составляющими: моментом вихревых токов и гистерезисным моментом (Рис.6.9). Асинхронный момент M_a есть результат взаимодействия вращающегося магнитного поля с вихревыми токами, которые индуцируются этим полем в сердечнике ротора. Т.к. ротор имеет большое активное сопротивление, то характеристика $M_a=f(s)$ практически линейна и асинхронный гистерезисный момент максимален при $s=1$. Двигатель используется в приводах небольшой мощности до 2000 Вт при частоте $f=50, 400$ и 500 Гц. Достоинства гистерезисного двигателя: простота, надежность, плавность входа в синхронизм, значительный пусковой момент, бесшумность,

малый пусковой ток, сравнительно высокий КПД (до 60%). Недостатки: дороговизна, склонность к качаниям при резких изменениях нагрузки, значительный нагрев ротора.

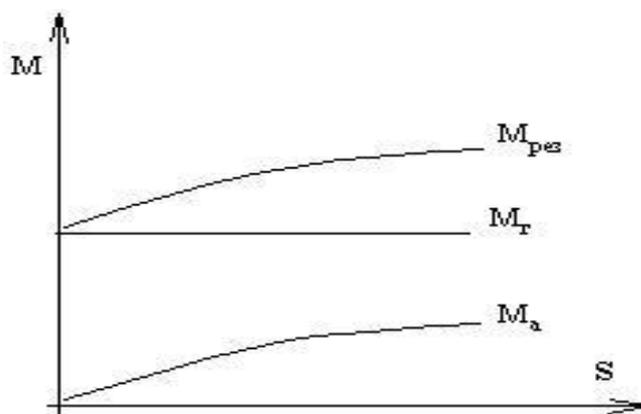


Рис. 6.9. Механическая характеристика гистерезисного двигателя

6.3. Синхронный реактивный и вентильный индукторный двигатели

Синхронный реактивный двигатель не имеет обмотки возбуждения. Его основной магнитный поток создается за счет намагничивающего тока обмотки статора. В таком двигателе действует только реактивный момент, определяемый выражением:

$$M_r = \frac{m_1}{2\omega_1} \cdot U_1^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2\theta), \quad (6.2)$$

где m_1 - число фаз обмотки статора, U_1 фазное напряжение, подведенное к обмотке статора, ω_1 - угловая синхронная скорость, X_q и X_d - индуктивное сопротивление ротора по поперечной и продольной осям; θ - угол между осью результирующего магнитного потока и осью полюсов ротора. Реактивный момент не зависит от величины магнитного потока возбуждения, поэтому он имеет место даже при отсутствии возбуждения синхронной машины. Появление реактивного момента обусловлено разностью магнитных сопротивлений по продольной и поперечной осям. Если $X_q = X_d$ реактивного момента не возникает. Магнитное поле статора за счет притяжения явно выраженных полюсов ротора создает силы, стремящиеся повернуть ротор в положение

ние при котором магнитный поток статора имеет на своём пути минимальное сопротивление. Магнитное поле статора вращается, ротор вращается синхронно с полем, но отстаёт от поля на некоторый пространственный угол. За счёт этого угла появляется тангенциальная составляющая электромагнитной силы. Сумма всех потенциальных составляющих создаёт реактивный момент. Реактивный момент и приводит ротор электрического двигателя во вращение с синхронной частотой вращения n_1 . Неравенство индуктивных сопротивлений обмотки статора по продольной и поперечной осям $X_q < X_d$ имеет место лишь при явно полюсном роторе. Следовательно, ротор реактивного двигателя обязательно должен быть явно полюсным. Конструктивно реактивный двигатель отличается от асинхронного лишь ротором. Типы роторов приведены на рис. 6.10.

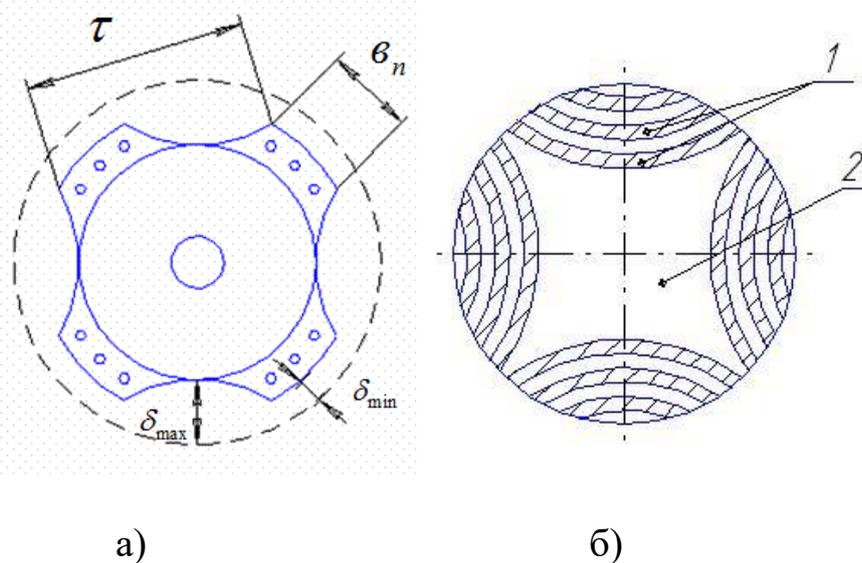


Рис. 6.10. Типы роторов реактивных двигателей

Наиболее часто применяется реактивный двигатель с ротором, устройство которое показано на рис. 6.10, а. Он отличается от обычного ротора АД лишь наличием впадин - вырезов, которые образуют явно выраженные полюсы. Ротор имеет короткозамкнутую обмотку, выполненную по типу "белчьей клетки" и необходимую для создания пускового момента. Двигатель пускается как асинхронный. В реактивных двигателях, предназначенных для работы в схемах синхронной связи, ротор изготавливают из алюминия, в который при отливке закладывают полосы из стали 1 (рис. 6.10, б). Угловая характеристика реактивного двигателя имеет вид, представленный на рис. 6.11. Из выражения

для реактивного момента (6.2) следует, что максимальное значение M_r наступает при нагрузке $\theta = 45^\circ$ (кривая 1). Но в этом случае не учитывается влияние активного сопротивления обмотки статора на зависимость $M_r = f(\theta)$. Под влиянием активного сопротивления максимальное значение наступает при $\theta_{кр} < 45^\circ$.

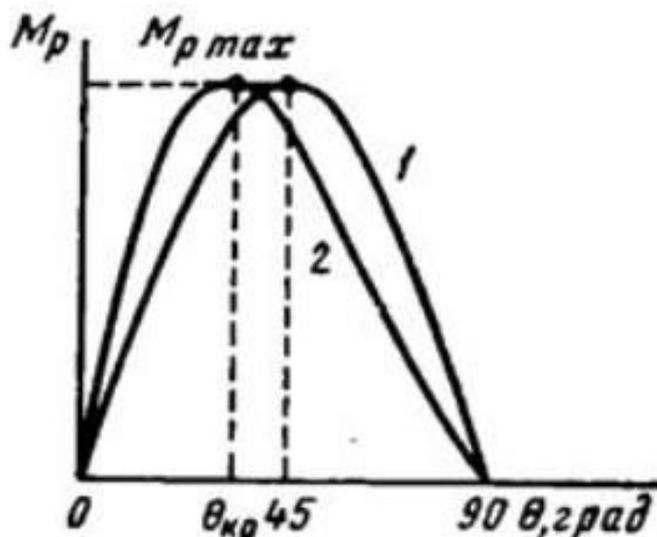


Рис. 6.11. Угловая характеристика реактивного двигателя

Синхронные реактивные двигатели изготавливают сегодня на базе асинхронных, и при тех же габаритах и установочно-присоединительных размерах получается более высокий КПД, достигается более высокая удельная мощность. Набранный из тонколистовой электротехнической стали, ротор реактивного синхронного двигателя имеет простую и надежную конструкцию без короткозамкнутой обмотки и без магнитов, поэтому в роторе исключены токи вызывающие вредный нагрев, - срок службы повышается, а отсутствие магнитов удешевляет себестоимость продукта, включая до минимума сниженные затраты на техобслуживание. Благодаря сравнительной легкости ротора, его собственный момент инерции низок, поэтому двигатель быстрее разгоняется до номинальных оборотов, что приводит к экономии электроэнергии. Частотный преобразователь в качестве регулятора скорости делает управление двигателем очень гибким в широком диапазоне рабочих скоростей. Что касается недостатков, то он всего один: потребность в преобразователе частоты.

Разновидностью синхронного реактивного двигателя является вентильно-индукторный двигатель на базе индукторной электрической машины с пассивным ротором, с явно выраженными полюсами статора, на которых установлены обмотки, подобные катушками возбуждения двигателей постоянного тока. Число полюсов ротора, т.е. зубцов не равно числу явно выступающих полюсов статора. Двигатель управляется транзисторным коммутатором, осуществляющим поочередное переключение обмоток индуктора в соответствии с положением ротора. Для этого используют датчики положения ротора DR или математическую модель, вычисляющую положение ротора на основе измеренных напряжения и тока в цепи индукторов. Принцип работы вентильно-индукторного двигателя состоит в поочередном последовательном включении индукторов ($a—a, b—b, c—c$), поток которых замыкается через зубцы ротора (рис. 6.12). Возбуждение индуктора вызывает возникновение электромагнитных сил, стремящихся повернуть ротор двигателя так, чтобы зубец ротора стал по оси потока магнитного поля, создаваемого индуктором. Для дальнейшего движения ротора необходимо отключить данный индуктор и включить следующий по направлению движения ротора. Благодаря такому принципу работы вентильно-индукторные двигатели называют *переключаемыми реактивными двигателями*. Под действием реактивных сил (моментов), обусловленных явлением втягивания ферромагнитного сердечника в магнитное поле катушки с током, происходит силовой поворот ротора. Так как число зубцов статора и ротора различно, то в том положении, когда зубец ротора находится напротив одного индуктора, для следующего индуктора зубец ротора окажется в несогласованном положении. Поэтому при отключении первого индуктора и включении последующего ротор снова повернется на одно полюсное деление. Последовательная коммутация индукторов в функции датчика через систему управления CS обеспечивает создание вращающего момента и, следовательно, непрерывное вращение ротора двигателя. При прямоугольной форме импульсов напряжения развиваемый электромагнитный момент имеет значительные пульсации. В современных индукторных двигателях применяют формирование кривой тока в обмотках индуктора по определенному закону, что достигается широтно-импульсной модуляцией транзисторов в схеме питания обмотки.

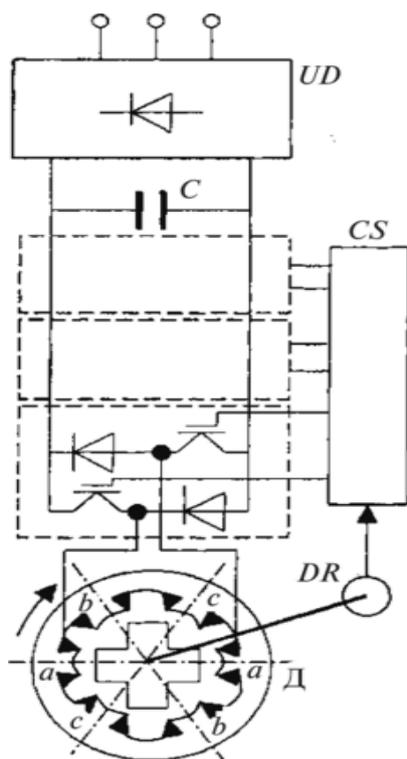


Рис. 6.12. Функциональная схема вентильно-индукторного привода

Направление вращения данного реактивного двигателя не зависит от направления тока в обмотках индуктора, поэтому ток может быть однополярным. На рис. 6.13 показана схема силовой части преобразователя, питающего каждую фазу индуктора. Схема включает силовые транзисторы $VT1$, $VT2$, через которые происходит включение и формирование тока в обмотке, и обратные диоды $VD1$, $VD2$, через которые магнитная энергия возвращается в конденсатор C при отключении транзисторов. Датчик тока ДТ служит для обратной связи, позволяющей формировать требуемую форму импульса тока. Значение электромагнитного момента определяется средним значением тока, подаваемого в обмотки индуктора, поэтому регулирование момента двигателя производится изменением напряжения, подаваемого к обмоткам, *методом широтно-импульсного регулирования*. В рассматриваемых приводах для регулирования скорости вводят внешний контур скорости. Переключаемые реактивные электродвигатели характеризуются конструктивной простотой и экономичностью. Они находят применение в электрических транспортных машинах и в качестве электроприводов общепромышленного назначения, работаю-

щих со «спокойной» нагрузкой. Эффективно использование вентильно-индукторных приводов для высокоскоростных механизмов (6000 об/мин и выше).

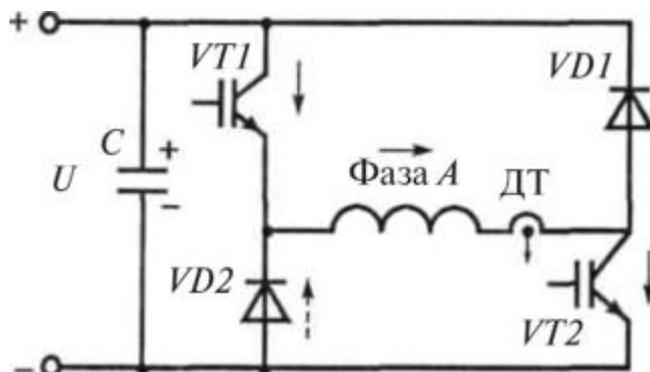


Рис. 6.13. Силовая схема питания одной фазы вентильно-индукторного двигателя

Вопросы для самопроверки к главе 6:

1. Как работает шаговый двигатель?
2. Назовите достоинства и недостатки шагового двигателя.
3. Чем отличаются шаговые двигатели с пассивным и активным ротором?
4. Назовите конструктивные виды шаговых двигателей.
5. Как устроен шаговый двигатель с постоянными магнитами?
6. Как устроен гибридный шаговый двигатель?
7. Как выполняются обмотки статора шаговых двигателей?
8. Назовите способы управления шаговыми двигателями.
9. Объясните явление магнитного гистерезиса.
10. Как устроен гистерезисный двигатель?
11. Как работает гистерезисный двигатель?
12. Опишите структурную схему вентильного индукторного двигателя и назначение ее отдельных элементов.
13. Опишите особенности конструкции и возможные конструктивные исполнения вентильного индукторного двигателя.
14. Опишите принцип действия вентильного индукторного двигателя. Поясните, почему этот тип электромеханического преобразователя энергии принципиально не может работать без системы управления и преобразователя частоты.
15. Расскажите, какие Вы знаете алгоритмы коммутации фаз индукторной машины для вентильного индукторного двигателя и их характеристики.

16. Выведите соотношение частоты коммутации фаз f и частоты вращения ротора n для известных Вам алгоритмов коммутации. Найдите частоту коммутации фаз ВИД, представленных в Приложении 1, если частота их вращения равна 1000, 1500 и 3000 об/мин, а фазы коммутируются по алгоритму несимметричной коммутации.

17. Выведите формулу для определения коэффициента электромагнитной редукиции $k_{ЭР}$ для вентильного индукторного двигателя. 18. Опишите характер магнитного поля в индукторной машины.

19. Какими достоинствами и недостатками обладает вентильного индукторного двигателя и почему?

20. Какие Вы знаете области практического применения вентильного индукторного двигателя?

Глава 7. ТРАНСФОРМАТОРЫ

7.1. Устройство и принцип действия трансформаторов

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения посредством электромагнитной индукции. Трансформатор, чаще всего, состоит из двух (а иногда и больше) взаимно неподвижных и электрически не связанных между собой обмоток 1 и 2 (рис. 7.1), располагаемых на ферромагнитном магнитопроводе 3.

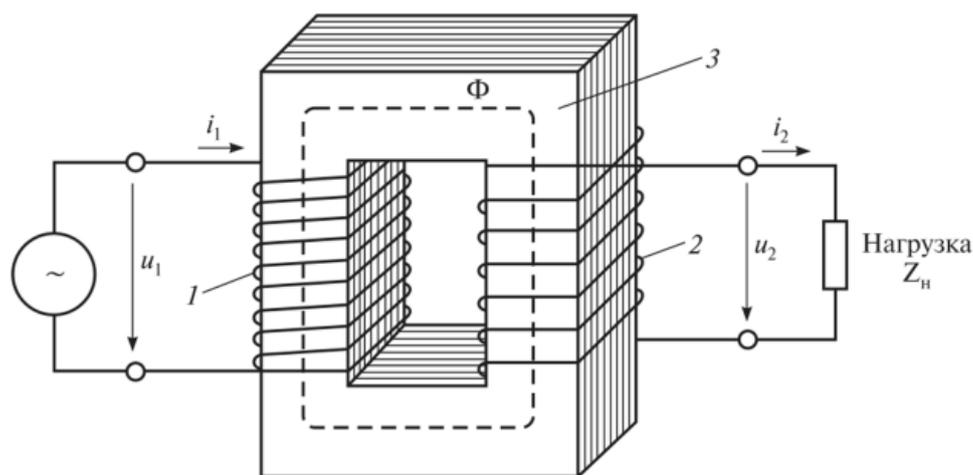


Рис. 7.1. Электромагнитная схема трансформатора напряжения

Обмотки имеют между собой магнитную связь, осуществляемую переменным магнитным полем. Ферромагнитный магнитопровод предназначен для усиления магнитной связи между обмотками. В зависимости от назначения трансформаторы разделяют на силовые и трансформаторы специального назначения. Силовые трансформаторы применяются в системах передачи и распределения электроэнергии, а также в различных схемах для получения требуемого напряжения. Трансформаторы специального назначения характеризуются разнообразием рабочих свойств и конструктивного исполнения. К ним относятся: трансформаторы для устройств автоматики выпрямительные, импульсные, испытательные, измерительные трансформаторы и т.д. Наибольшее распространение получили силовые трансформаторы, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными. Обмотка трансформатора, принимающая энергию из сети, называется первичной (обмотка 1 на рис.7.1), а обмотка, отдающая энергию на нагрузку — вторичной (обмотка 2 на рис.7.1). В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться от первичной любыми параметрами: значениями напряжения и тока, числом фаз, формой кривой напряжения (тока), частотой. Многообмоточные трансформаторы имеют несколько первичных и вторичных обмоток, в силовых трансформаторах общего назначения имеются только две обмотки — первичная и вторичная. Обмотку, имеющую наибольшее напряжение, называют обмоткой высшего напряжения (ОВН); обмотку низкого напряжения — обмоткой низшего напряжения (ОНН). В зависимости от числа фаз трансформаторы делят на однофазные, трехфазные и многофазные. Обмотки трансформатора рассчитываются для подключения к сетям с разными напряжениями. Обмотка, предназначенная для присоединения к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (ВН), а подсоединяемая к сети с меньшим напряжением — обмоткой низшего напряжения (НН). Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется понижающим, а если больше — повышающим. В зависимости от подключения тех или иных обмоток к сети каждый трансформатор может быть, как повышающим, так и понижающим. Обычно обмотки высокого напряжения наматывают более тонким проводом, чем обмотки низкого напряжения. Трансформаторы с двумя обмотками называются двухобмоточными. Изготавливаются также трансформаторы, у которых имеется три или более электрически не связанных обмоток.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока u_1 в витках этой обмотки протекает переменный ток I_1 который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС: в первичной обмотке ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -w_1 (d\Phi/dt), \quad (7.1)$$

во вторичной обмотке ЭДС взаимоиндукции

$$e_2 = -w_2(d\Phi/dt), \quad (7.2)$$

где w_1 и w_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора. При подключении нагрузки Z_n к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки начинает протекать ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение u_2 . В повышающих трансформаторах $u_2 > u_1$, а в понижающих $u_2 < u_1$. ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков W_1 и W_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор практически на любое соотношение напряжений.

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным, как по величине, так и по направлению, поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а, следовательно, электроэнергия из первичной цепи не будет передаваться во вторичную. Вследствие этого в первичной обмотке будет протекать большой ток, так как при отсутствии ЭДС он будет ограничиваться только относительно небольшим активным сопротивлением обмотки. Этот ток может вызвать недопустимый нагрев обмотки и даже ее перегорание.

7.2. Классификация и основные компоненты трансформаторов

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:

- по назначению - силовые общего и специального назначения, импульсные, для преобразования частоты и т.д.;
- по виду охлаждения - с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением;
- по числу трансформируемых фаз - однофазные и трехфазные;
- по форме магнитопровода - стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;
- по числу обмоток на фазу - двухобмоточные, многообмоточные.

Силовой трансформатор — трансформатор, предназначенный для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приёма и использования электрической энергии.

Автотрансформатор — вариант трансформатора, в котором первичная и вторичная обмотки соединены напрямую, и имеют за счёт этого не только электромагнитную связь, но и электрическую. Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные напряжения. Преимуществом автотрансформатора является более высокий КПД, поскольку лишь часть мощности подвергается преобразованию — это особенно существенно, когда входное и выходное напряжения отличаются незначительно. Недостатком является отсутствие электрической изоляции (гальванической развязки) между первичной и вторичной цепью. Применение автотрансформаторов экономически оправдано вместо обычных трансформаторов для соединения эффективно заземленных сетей с напряжением 110 кВ и выше при коэффициентах трансформации не более 3-4. Существенным является меньший расход стали для сердечника, меди для обмоток, меньший вес и габариты, и в итоге — меньшая стоимость.

Трансформатор тока — трансформатор, питающийся от источника тока. Типичное применение — для снижения первичного тока до величины, используемой в цепях измерения, защиты, управления и сигнализации. Номинальное значение тока вторичной обмотки 1А, 5А. Первичная обмотка трансформатора тока включается в цепь с измеряемым переменным током, а во вторичную включаются измерительные приборы. Ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора тока,

равен току первичной обмотки, деленному на коэффициент трансформации.

Трансформатор напряжения — трансформатор, питающийся от источника напряжения. Типичное применение — преобразование высокого напряжения в низкое в цепях, в измерительных цепях и цепях РЗА. Применение трансформатора напряжения позволяет изолировать логические цепи защиты и цепи измерения от цепи высокого напряжения.

Импульсный трансформатор — это трансформатор, предназначенный для преобразования импульсных сигналов с длительностью импульса до десятков микросекунд с минимальным искажением формы импульса. Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения, обычно периодически повторяющихся с высокой скважностью. В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к ИТ заключается в неискажённой передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход ИТ напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.

Разделительный трансформатор — трансформатор, первичная обмотка которого электрически не связана со вторичными обмотками. Силовые разделительные трансформаторы предназначены для повышения безопасности электросетей, при случайных одновременных прикосновениях к земле и токоведущим частям или нетокведущим частям, которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения изоляции. Сигнальные разделительные трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку электрических цепей.

Пик-трансформатор — трансформатор, преобразующий напряжение синусоидальной формы в импульсное напряжение с изменяющейся через каждые полпериода полярностью.

Сдвоенный дроссель (встречный индуктивный фильтр) — конструктивно является трансформатором с двумя одинаковыми обмотками. Благодаря взаимной индукции катушек он при тех же размерах более эффективен, чем обычный дроссель. Сдвоенные дроссели получили широкое распространение в качестве входных фильтров блоков питания; в дифференциальных сигнальных фильтрах цифровых линий, а также в звуковой технике.

Импульсные трансформаторы (ИТ). Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения, обычно периодически повторяющихся с высокой скважностью. В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к ИТ, заключается в неискажённой передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход ИТ напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.

Измерительные трансформаторы. Применяют для измерения очень больших или очень маленьких переменных напряжений и токов в цепях РЗиА.

Измерительно-силовые трансформаторы. Имеют широкое применение в схемах генераторов переменного тока малой и средней мощности (до мегаватта), например, в дизель-генераторах. Такой трансформатор представляет собой измерительный трансформатор тока с первичной обмоткой, включённой последовательно с нагрузкой генератора. Со вторичной обмотки снимается переменное напряжение, которое после выпрямителя подаётся на обмотку подмагничивания ротора. (Если генератор трёхфазный, обязательно применяется и трёхфазный трансформатор). Таким образом, достигается стабилизация выходного напряжения генератора — чем больше нагрузка, тем сильнее ток подмагничивания, и наоборот.

Основными частями конструкции трансформатора являются:
- магнитная система (магнитопровод); - обмотки; - система охлаждения.

Магнитная система (магнитопровод) трансформатора — комплект элементов (чаще всего пластин) электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, собранных в определённой геометрической форме, предназначенный для локализации в нём основного магнитного поля трансформатора. Магнитная система в полностью собранном виде совместно со всеми узлами и деталями, служащими для скрепления отдельных частей в единую конструкцию, называется остовом трансформатора. Часть магнитной системы, на которой располагаются основные обмотки трансформатора, называется стержень. Часть магнитной системы трансформатора, не несущая основных обмоток и служащая для замыкания магнитной цепи, называется ярмо.

Основным элементом обмотки является виток — электрический проводник, или ряд параллельно соединённых таких проводников (многопроволочная жила), однократно обхватывающий часть магнитной системы трансформатора, электрический ток которого совместно с токами других таких проводников и других частей трансформатора создаёт магнитное поле трансформатора и в котором под действием этого магнитного поля наводится электродвижущая сила.

Обмотка — совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведённые в витках. В трёхфазном трансформаторе под обмоткой обычно подразумевают совокупность обмоток одного напряжения трёх фаз, соединяемых между собой.

Проводник обмотки в силовых трансформаторах обычно имеет квадратную форму для наиболее эффективного использования имеющегося пространства (для увеличения коэффициента заполнения в окне сердечника). При увеличении площади проводника проводник может быть разделён на два и более параллельных проводящих элемента с целью снижения потерь на вихревые токи в обмотке и облегчения функционирования обмотки. Проводящий элемент квадратной формы называется жилой. Каждая жила изолируется при помощи либо бумажной обмотки, либо эмалевого лака. Две отдельно изолированных и параллельно соединённых жилы иногда могут иметь общую бумажную изоляцию. Две таких изолированных жилы в общей бумажной изоляции называются кабелем. Особым видом проводника обмотки является непрерывно транспонированный кабель. Этот кабель состоит из жил, изолированных при помощи двух слоёв эмалевого лака, расположенных в осевом положении друг к другу, как показано на рисунке. Непрерывно транспонированный кабель получается путём перемещения внешней жилы одного слоя к следующему слою с постоянным шагом и применения общей внешней изоляции.

Бумажная обмотка кабеля выполнена из тонких (несколько десятков микрометров) бумажных полос шириной несколько сантиметров, намотанных вокруг жилы. Бумага заворачивается в несколько слоёв для получения требуемой общей толщины.

Для охлаждения трансформаторов используется естественное воздушное охлаждение, естественное масляное охлаждение и масляное охлаждение с дутьем.

Вопросы для самопроверки к главе 7:

1. Что такое трансформатор?
2. Изобразите схему простейшего трансформатора напряжения.

3. Объясните принцип работы трансформатора.
4. Для чего служат трансформаторы?
5. Приведите классификацию трансформаторов.
6. Назовите основные компоненты трансформатора.

Практическое задание к разделу 7

Задание П7.1 *Определить характеристики однофазного и трехфазного трансформаторов при различных схемах соединения первичных и вторичных обмоток.*

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: трансформаторы, принцип действия, работа под нагрузкой, КПД, рабочие характеристики; однофазный и трёхфазный трансформатор.

2. Подготовить таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

Содержание работы

1. Определение параметров трансформатора при соединении «звезда-звезда» (Y/Y).

2. Определение параметров трансформатора при соединении «звезда-треугольник» (Y/Δ).

3. Определение параметров трансформатора при соединении «треугольник-треугольник» (Δ/Δ).

4. Определение параметров трансформатора при соединении «треугольник-звезда» (Δ/Y).

Описание виртуальной установки

Виртуальная установка представлена на рис. П7.1. Модель содержит:

- источник переменного напряжения E_1 из библиотеки Power System Blockset/Electrical Sources;
- измерители напряжения V_1 , V_2 измерители тока I_1 и I_2 в первичной и вторичной цепях трансформатора из библиотеки Power System Blockset/Measurement;
- исследуемый трансформатор (*Linear Transformer*) и нагрузку (*R Load*) из библиотеки Power System Blockset/Elements;
- измерители активной и реактивной мощности в первичной и вторичной цепях трансформатора (P_1 Q_1 ; P_2 Q_2) из библиотеки Power System Blockset/Extras/Measurement;
- блок пользователя (*Powergui*), который измеряет значения V_1 , V_2 ,

- блоки *Display1*, *Display2* для количественного представления измеренных мощностей и блок *Scope* для наблюдения формы кривых тока и напряжения во вторичной цепи являются блокам главной библиотеки Simulink/Sinks.

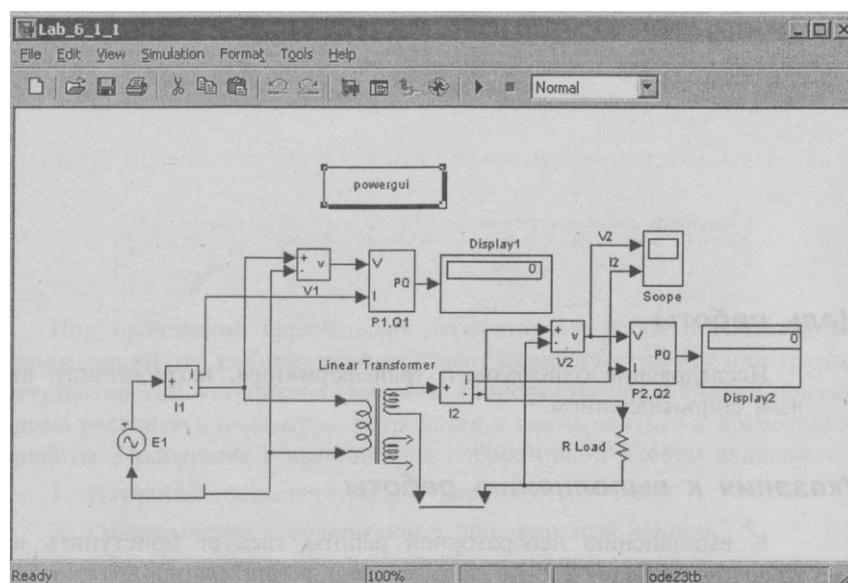


Рис. П.7.1. Модель для исследования однофазного трансформатора

Параметры трансформаторов для выполнения лабораторной работы приведены в табл. П 7.1.

Таблица П7.1

Тип трансформатора	S_H , кВА	U_k , %	P_k , Вт	P_{10} , Вт	I_{10} , %
ТС-10/066	10	4,5	280	90	7
ТС-16/066	16	4,5	400	125	5,8
ТС-25/066	25	4,5	560	180	4,8
ТС-40/066	40	4,5	800	250	4,0
ТС-63/066	63	4,5	1090	355	3,3
ТС-100/066	100	4,5	1500	500	2,7
ТС-160/066	160	4,5	2060	710	2,3

На рис. П7.2 представлена модель трёхфазного трансформатора. По сравнению с моделью однофазного трансформатора (рис. П7.1) здесь не используются блоки для измерения основных характеристик (основные характеристики трехфазного трансформатора и однофазного трансформатора идентичны), но добавлен блок *Multimeter*, изме-

ряющий токи и напряжения трансформатора. Значения этих токов отчитываются с окна блока *Powergui*. Там же снимаются значения входного U_1 и выходного U_2 напряжений и разность фаз между ними.

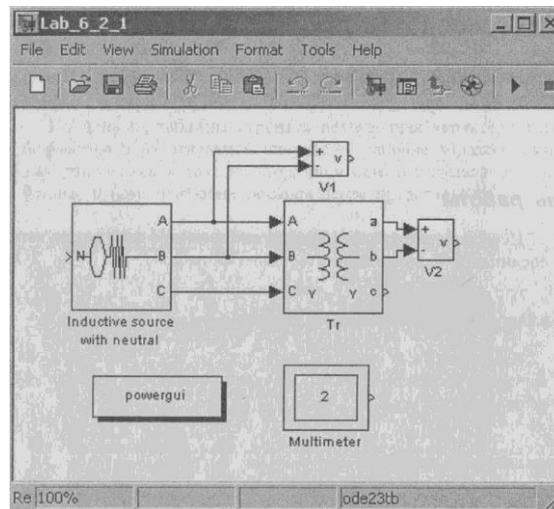


Рис. П 7.2. Модель трёхфазного трансформатора

Окно настройки параметров трёхфазного трансформатора показано на рис. П7.3.

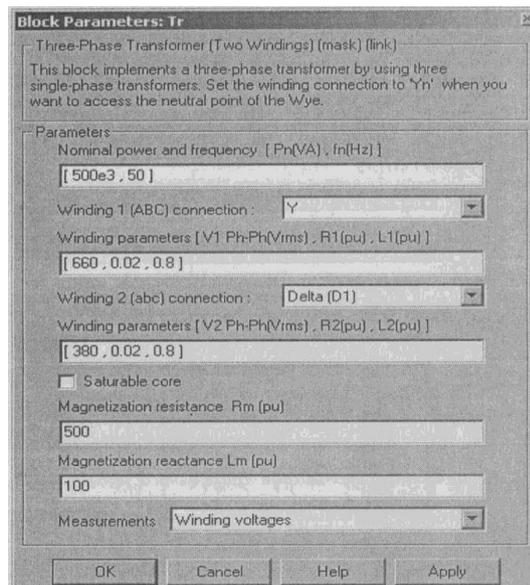


Рис. П7.3. Окно настройки параметров трёхфазного трансформатора

В отличие от окна настройки параметров однофазного трансформатора оно содержит два дополнительных поля: *Winding 1 (ABC) connection* — схема соединения первичных обмоток; *Winding 2 (abc) connection* — схема соединения вторичных обмоток.

В выпадающем меню этих полей задается схема соединения. В поле *Measurement* выбрана опция *Windind Voltage*, при которой изменяются напряжения обмоток. Параметры источника питания Inductive source (рис. 1.2) задаются в соответствии с параметрами трансформатора. Окно настройки источника питания показано на рис. П 7.4.

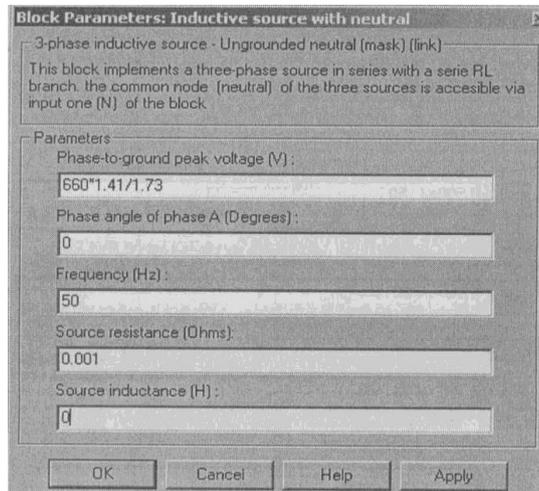


Рис. П 7.4. Окно настройки параметров трехфазного источника

Параметры моделирования видны на рис. П 7.5.

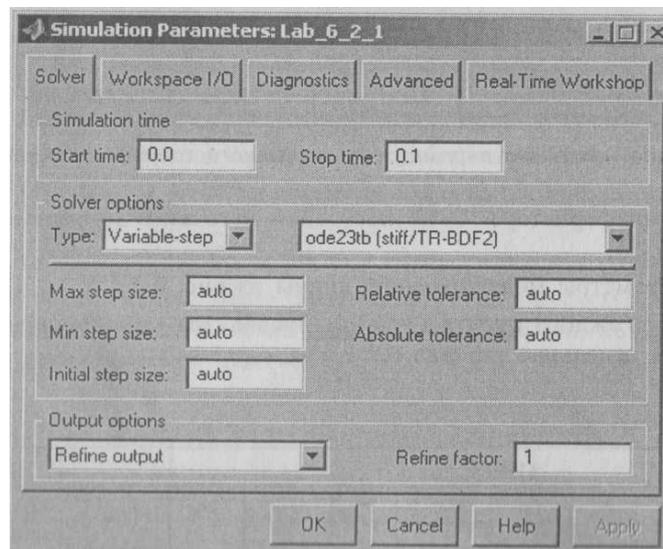


Рис. П7.5. Параметры моделирования

Для каждого пункта содержания работы (1-4) проводится моделирование и заполняется отдельная табл. П7.2.

Таблица П7.2

Схема соедин.	Измерения								Вычисления
	$U_{1\phi}$ В	$I_{1\phi}$ А	U_1 , В	φ_1 , град	$U_{2\phi}$ В	$I_{2\phi}$ А	U_2 , В	φ_{12} , град	Коэффициент трансформации

На рис. П7.6 показано окно блока *Powergui* с результатами моделирования при соединении обмоток по схеме «звезда-звезда». В левой колонке представлены измеряемые переменные, в средней — их действующие значения, в правой — их начальные фазы.

Коэффициент трансформации и разность фаз между входным (U_1) и выходным (U_2) напряжениями рассчитывается по выражениям:

$$n = \frac{U_1}{U_2}, \quad \varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

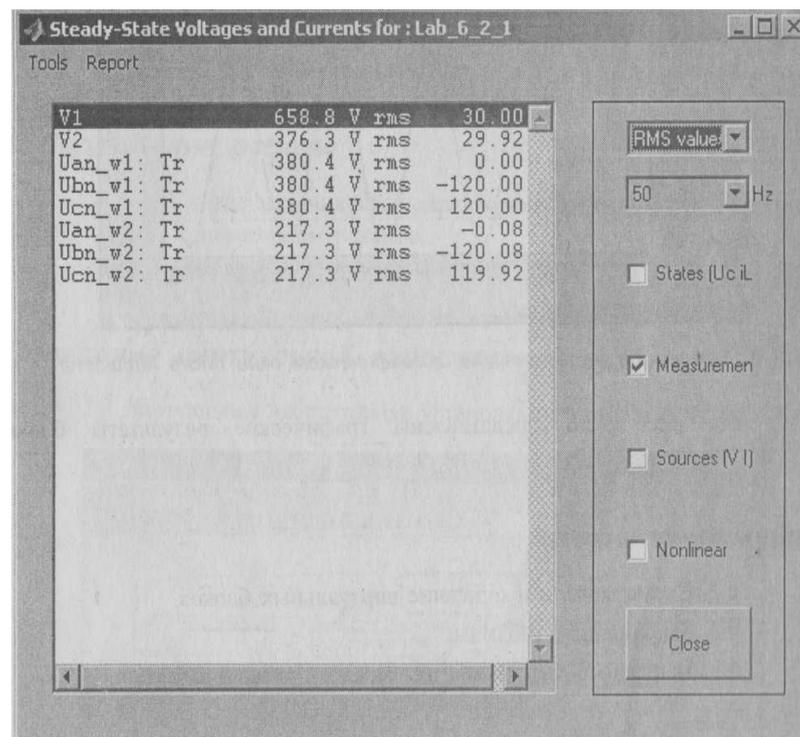


Рис. П7.6. Результаты моделирования при соединении обмоток Y/Y.

На рис. П 7.7 представлены графические результаты (пример) блока *Multimeter*

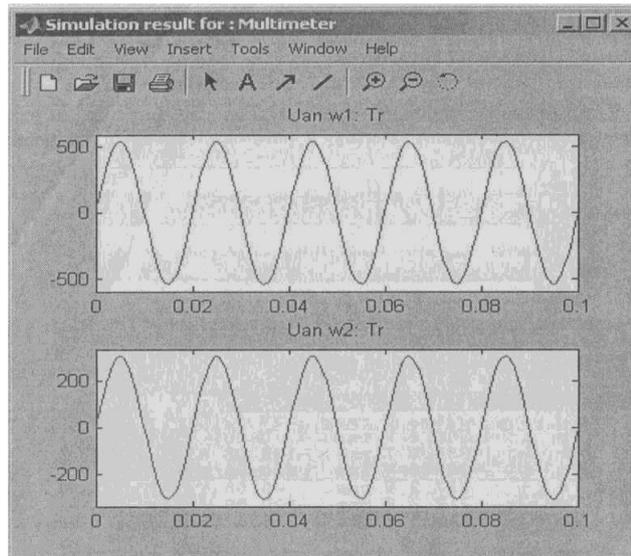


Рис. П 7.7. Результаты моделирования в графическом окне блока *Multimeter*.

Содержание отчета

1. Схема модели и описание виртуальных блоков.
2. Заполненные таблицы.
3. Векторные диаграммы для каждого пункта работы.

Примечание. Векторные диаграммы по каждому пункту строятся отдельно для первичной и вторичной цепи.

Вопросы для самопроверки:

1. Что такое трехфазный трансформатор?
2. Что отражается в модели однофазного трансформатора?
3. Что отражается в модели трехфазного трансформатора?
4. Объясните результаты моделирования однофазного трансформатора.
5. Объясните результаты моделирования трехфазного трансформатора.

Глава 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОЛЫ И УСТРОЙСТВА С МАШИНАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СПЕЦИАЛЬНЫМИ СИНХРОННЫМИ МАШИНАМИ В АВТОМОБИЛЯХ

8.1. Тяговый привод электромобиля

Привод двигателя электромобиля относится к тяговому электроприводу. Тяговый электропривод - привод, предназначенный для приведения в движение транспортных средств (электровозов, электропо-

ездов, тепловозов и теплоходов с электроприводом, трамваев, троллейбусов, электромобилей и т.п.). Тяговый электропривод классифицируют по роду тока (постоянного и переменного тока), системе передачи вращающего усилия от вала двигателя к движущему механизму (с индивидуальным и групповым электроприводом), системе вентиляции (с самовентиляцией, независимой и смешанной вентиляцией). Наиболее употребительны в качестве тягового электродвигателя - электродвигателя постоянного тока, последовательного и независимого возбуждения, синхронные двигатели с постоянными магнитами и трёхфазные асинхронные электродвигатели. Тяговый электропривод электромобилия может быть выполнен по четырем основными схемам:

1. Широтно-импульсный преобразователь с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Силовой преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) служит для преобразования постоянного напряжения питания (от аккумуляторной батареи) в переменное трехфазное, плавно изменяющееся по амплитуде и частоте в соответствии с требуемыми алгоритмами функционирования. Обеспечивает реверс, плавное регулирование тягового момента, кроме того возможна реализация плавного режима рекуперативного торможения;
2. Широтно-импульсный преобразователь и синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) (вентильный индукторный электропривод).
3. Импульсный преобразователем напряжения с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения.
4. Импульсным преобразователем напряжения с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

В настоящее время все более широкое применение находят системы электропривода с СДПМ. Что связано с постоянным удешевлением магнитных материалов, а также ускоряющимся развитием аппаратной базы систем управления и устройств силовой электроники. Кроме того, вентильный двигатель имеет ряд конструктивных и технико-эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими существующими типами электрических машин, к их числу можно отнести:

1. Бесконтактность и отсутствие узлов, требующих обслуживания. Отсутствие у вентильных электродвигателей скользящих электрических контактов существенно повышает их ресурс и надежность по сравнению с электрическими машинами постоянного тока, расширяет диапазон достижимых частот вращения. Обмотка якоря СДПМ может быть запитана более высоким номинальным напряжением, поэтому кон-

структивная постоянная момента с вентильным двигателем существенно превышает аналогичную величину классических машин постоянного тока, что позволяет использовать при подключении СДПМ кабели меньшего сечения и преобразователи электрической энергии на меньшие токи.

2. Большая перегрузочная способность по моменту (кратковременно допустимый момент и ток СДПМ могут превышать номинальные значения в 5 и более раз);

3. Высокое быстродействие в переходных процессах по моменту;

4. Абсолютно жесткая механическая характеристика и практически неограниченный диапазон регулирования частоты вращения (1:10000 и более). Возможность регулирования частоты вращения как вниз от номинальной (с постоянством длительно допустимого и максимального моментов), так и вверх (с постоянством мощности);

5. Наилучшие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности). КПД вентильных двигателей превышает 90% и незначительно отклоняется от номинального при вариациях нагрузки, в то время как у серийных асинхронных двигателей мощностью до 10 кВт максимальный КПД составляет не более 87,5% и существенно зависит от момента. Так, уже при половинной нагрузке на валу он может упасть до 60-70%;

6. Минимальные токи холостого хода;

7. Минимальные массогабаритные показатели при прочих равных условиях. Системы с ШИМ преобразователями представляют собой наиболее современное, более сложное и дорогостоящее решение. Силовой преобразователь с ШИМ реализуется на базе высокочастотных IGBT транзисторов, которые значительно повышают стоимость системы электропривода в целом, кроме того, использование асинхронного электродвигателя либо синхронного двигателя с постоянными магнитами подразумевает формирование определенного закона управления, что является сложной вычислительной задачей, требующей использования значительных ресурсов вычислительной микропроцессорной техники.

Одним из вариантов размещения силового оборудования является, так называемая «скейтборд» -платформа (рис. 8.1). На осях расположены силовые блоки двигателя 4 и силовые преобразователи (инверторы) 2. В колесной базе размещаются аккумуляторные батареи 1 и блок контроллеров 3. Подвеска — единственное, что напоминает здесь об автомобилях с ДВС.

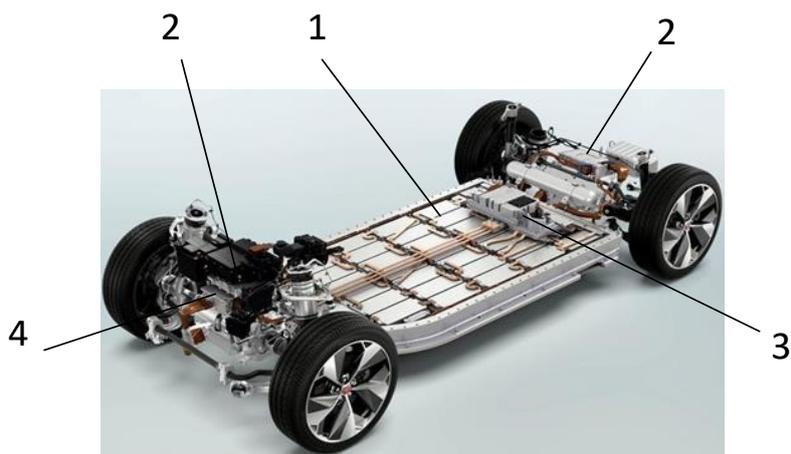


Рис. 8.1. Вариант размещения оборудования электромобиля

Спереди применяются двойные поперечные рычаги. Трансмиссия электромобиле представлена двумя элементами: дноскоростной коробкой передач, которая передаёт производимую двигателем мощность на ведущие колёса, и простым дифференциалом.

Единственное назначение коробки передач в электромобиле — это снижение скорости вращения и связанное с этим увеличение крутящего момента. В некоторых моделях электромобилей коробка передач отсутствует, её функции выполняет понижающий редуктор. Переход к задней передаче осуществляется благодаря изменению чередования фаз в двигателе. Привод электромобиля может быть оснащён одним двигателем (рис. 8.2) или двумя спаренными двигателями, работающими по схеме «электрический вал» (рис. 8.3).

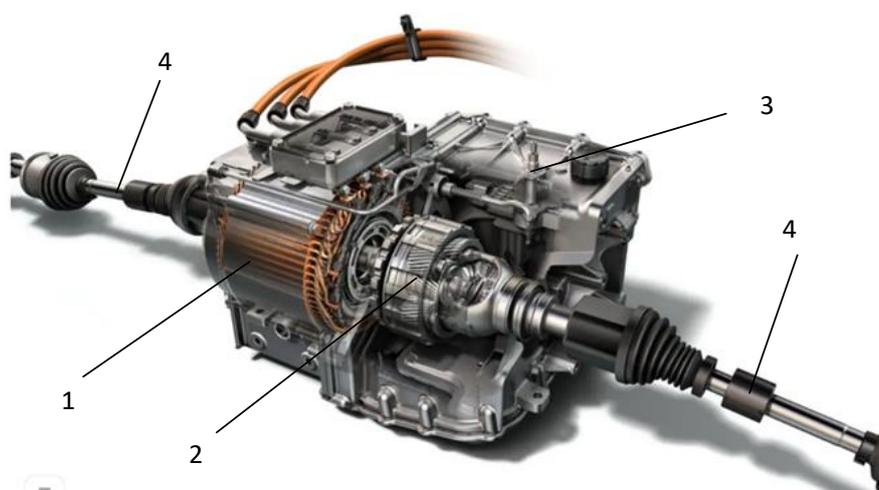


Рис. 8.2. Привод электромобиля с одним двигателем

Здесь 1 – приводной двигатель, 2 – понижающий редуктор с дифференциалом, 3 – инвертор, 4 – шрусы.

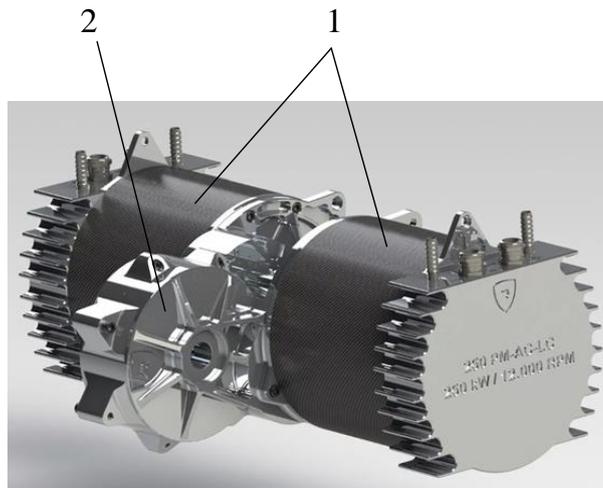


Рис. 8.3. Привод электромобиля с двумя двигателями

Здесь два двигателя 1 передают мощность к нагрузке через механическую передачу 2. Вариантом привода электромобиля является исполнение тягового электродвигатель с двумя роторами, соосно установленными в расточке неподвижного однопакетного статора с возможностью вращения друг относительно друга на оппозитных валах, внешние концы которых соединены с редукторами (рис. 8.4).

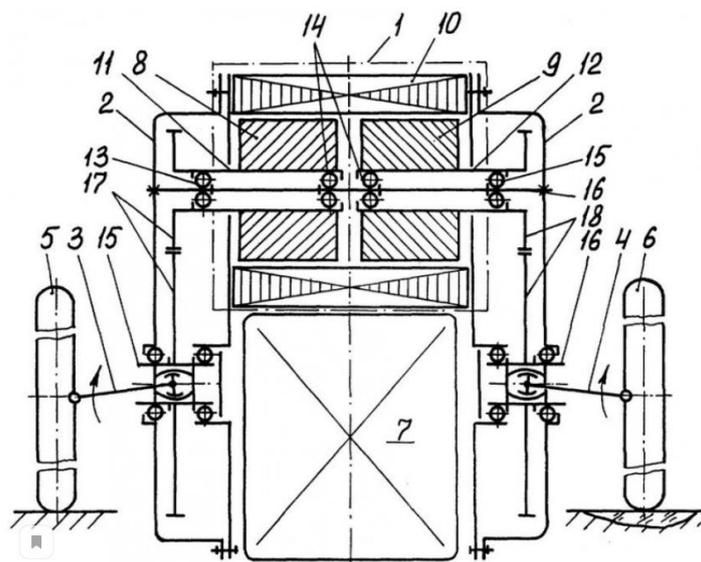


Рис. 8.4. Вариант привода электромобиля

Привод электромобиля содержит центральный тяговый электродвигатель 1, связанный через редукторы 2 с полуосями 3, 4 колес 5, 6 электромобиля, и систему управления 7. В состав электродвигателя 1 входят два ротора 8, 9 с короткозамкнутыми обмотками. Роторы 8, 9 установлены в расточке статора 10 соосно и с воздушным зазором, т.е. аксиально разнесены. При этом они полностью охвачены общим неподвижным однопакетным статором 10, преимущественно с единой обмоткой. "Единство" обмотки статора 10 предполагает единообразие фазной обмотки на всей длине статора, т.е. обеспечение по всей длине статора 10 вращающегося поля одного следования. Конструкция роторов 8, 9 и зазор между ними допускают относительное их вращение на индивидуальных валах 11 и 12 соответственно в подшипниковых узлах 13, 14, 15 на общей неподвижной оси 16. При этом валы 11, 12 расположены оппозитно. Система управления 7 и обмотка статора 10 обеспечивают возможность вращения роторов 8, 9 в одинаковом направлении. Внешние концы валов 11 и 12 соединены с соответствующими входными звеньями (в частности шестернями) редукторов 2. Если вначале использовали один (или сдвоенный) тяговый электродвигатель для электромобиля, редуктор которого соединен с трансмиссией, то сегодня все чаще обращаются к мотор-колесу (рис.8.5).

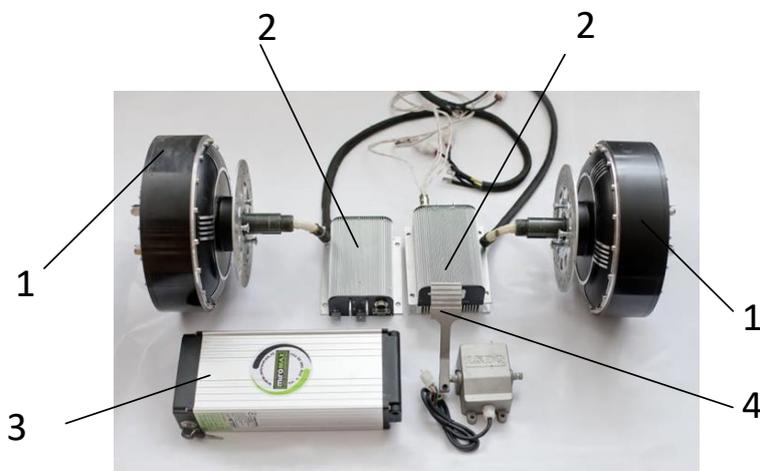


Рис. 8.5. Привод электромобиля с мотор – колесами

Здесь 1 - мотор – колеса, автономные инверторы, 3 – блок управления, 4 – педаль газа. Компьютерная программа с помощью блока управления 3 управляет при помощи инверторов 2 отдельным двигателем каждого из колес. Главным преимуществом является отсутствие трансмиссии, из-за которой силовая установка теряет значительную часть энергии. Помимо этого, удастся ликвидировать тормозную гидравлическую систему, функцию которой берут на себя электромоторы, а также

отдельные механизмы ESP и ABS. Требуемую мощность P тягового привода электромобиля можно приближенно определить по выражению:

$$P = \eta (g \cdot m \cdot V \cdot \sin \alpha + F_{\text{тр}} \cdot \cos \alpha + 0,5 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_v \cdot V^3). \quad (8.1)$$

Здесь η – к.п.д. трансмиссии, g - ускорение свободного падения, m – полная масса автомобиля, V - расчетная скорость движения автомобиля, α - максимально возможный угол наклона дороги к горизонту, $F_{\text{тр}}$ - сила трения колес об асфальт, C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления воздуха, S - площадь поперечного сечения автомобиля, ρ_v - плотность воздуха. Величина к.п.д. трансмиссии η обычно 0,75 -0,8 поэтому целесообразно использовать прямой привод. Типовая зависимость величины мощности привода от скорости (в соответствии с выражением (8.1)) имеет вид, представленный на рис. 8.6.

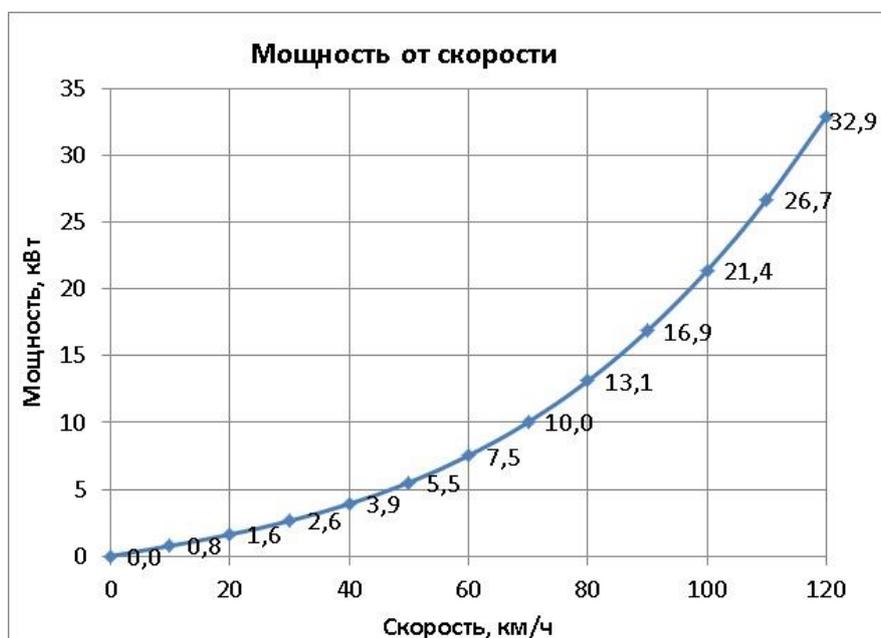


Рис.8.6. Типовая зависимость величины мощности привода от скорости

Типовая зависимость мощности от угла наклона дороги к горизонту представлена на рис. 8.7.

Аккумуляторная батарея представляет собой набор литий-ионных элементов, объединённых в блоки, которые соединены параллельно, чтобы обеспечить необходимую для запуска электромобиля мощность. Использование гликолевого хладагента, который проходит по металлическим трубкам через зазоры между элементами аккумулятора, поз-

воляет равномерно распределить температуру и избежать точек перегрева. Нагретый гликоль охлаждается через радиатор, установленный в передней части двигателя.

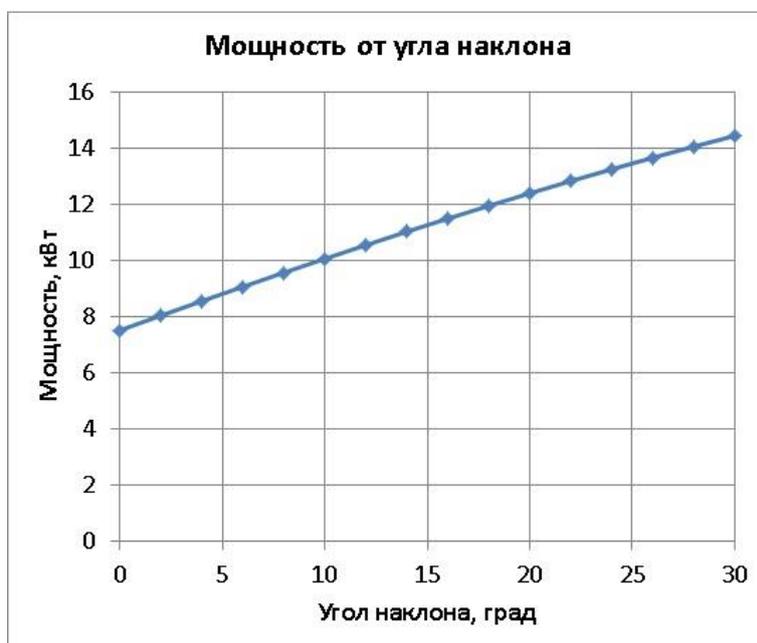


Рис. 8.7. Типовая зависимость величины мощности привода от угла наклона дороги к горизонту

Электронная система управления электромобилем используется для распределения высокого напряжения, контроля расхода электроэнергии и исправности тормозной системы. Важным элементом системы является контроллер, который передаёт необходимое количество тока от батареи к мотору. Ещё одной важной деталью электромобиля является инвертор, который преобразует постоянный ток, вырабатываемый аккумулятором, в переменный. Инвертор также регулирует частоту переменного тока, следовательно, и скорость движения. Инвертор подает ток на обмотку мотора, даже если мы отпустили газ. Во время езды накатом ротор вращается с определенной скоростью, потому что его крутят колеса. И в этот момент инвертор искусственно замедляет вращение электромагнитного поля в статоре. Возникает так называемая обратная электромагнитная сила, которая будет пытаться остановить ротор (поэтому машина замедляется), но при этом на обмотках появится избыточный ток. Вот эту разницу инвертор снимает с обмотки и перенаправляет обратно в батарею в виде постоянного тока. Если запутались, просто запомните: отпустил педаль газа на ходу — автомобиль стал заряжаться. Рекуперация есть у всех электромобилей, и принцип ее работы не отличается.

8.2. Автомобильный вентильный генератор

Автомобильный вентильный генератор представляет собой синхронную трехфазную машину с выпрямлением всей мощности полупроводниковым выпрямителем. Электрическая схема вентильного генератора показана на рис. 8.8. Обмотка возбуждения, питаемая постоянным током от выпрямителя, создает магнитный поток возбуждения Φ (ротора). Магнитное поле возбуждения, вращаясь вместе с ротором, пересекает проводники фазных обмоток якоря, расположенные в пазах статора. Вследствие этого в фазных обмотках якоря индуктируются переменные Э.Д.С. $E_{\Phi A}$, $E_{\Phi B}$, $E_{\Phi C}$ одинаковой величины и частоты, но сдвинутые по фазе на 120° .

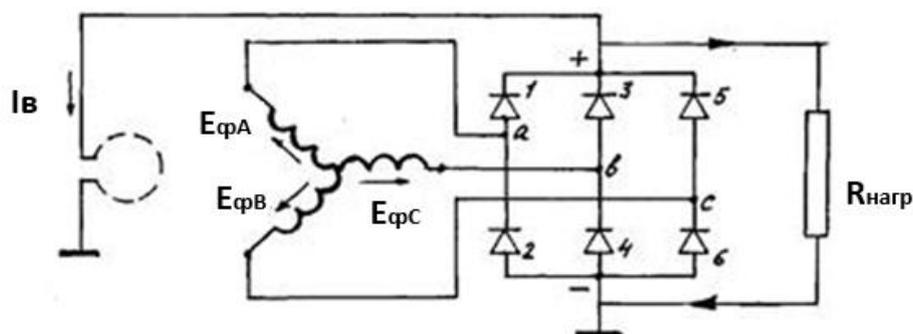


Рис. 8.8. Электрическая схема вентильного генератора

Концы фазных обмоток генератора соединены с выпрямителем, собранным по трехфазной двухполупериодной схеме. В этой схеме применены шесть вентилей. В верхней группе вентилей положительной полярности (1,3,5) катоды электрически связаны между собой, в нижней группе вентилей отрицательной полярности (2,4,6) аноды электрически связаны между собой. Теоретически в такой схеме в проводящем направлении работают из верхней группы вентиль, у которого анод имеет наиболее высокий потенциал, и из нижней группы вентиль, у которого катод имеет более низкий потенциал. Следовательно, в любой момент времени работают два вентиль: один положительной полярности (верхний), другой отрицательной полярности (нижний) и каждый вентиль пропускает ток в течение одной трети периода. Отличительной особенностью автомобильного вентильного генератора от генератора общепромышленного назначения является многополюсный ротор клювообразного типа с обмоткой возбуждения, состоящей из од-

ной катушки, размещенной внутри ротора; малая осевая длина и увеличенный диаметр электрической машины; малое число пазов на полюс и фазу. Э.Д.С. фазы обмотки якоря определяется выражением:

$$E_{\phi} = 4k_{\phi}fW_1k_0\Phi, \quad (8.2)$$

где k_{ϕ} – коэффициент формы поля; f – частота перемагничивания зубца якоря, сек; Φ – магнитный поток возбуждения (ротора), Вб; W_1 – число витков фазы обмотки якоря; k_0 – обмоточный коэффициент обмотки якоря. Величина линейной Э.Д.С. на выходе синхронного трехфазного генератора зависит от схемы соединения фазных обмоток статора:

при соединении в звезду (Y) $E_3 = \sqrt{3}E_{\phi}$; при соединении в треугольник (Δ) $E_T = E_{\phi}$. При подключении к обмотке якоря нагрузки $R_{нагр}$ в обмотках якоря (статора) появляются токи $I_{\phi A}$, $I_{\phi B}$, $I_{\phi C}$. Магнитное поле, созданное этими токами, вращается в пространстве с той же скоростью, что и ротор, т.е. синхронно. Многополюсный ротор одной катушке возбуждения получается за счет применения полюсного наконечника специальной формы – клювообразный полюсный наконечник (рис. 8.9.).

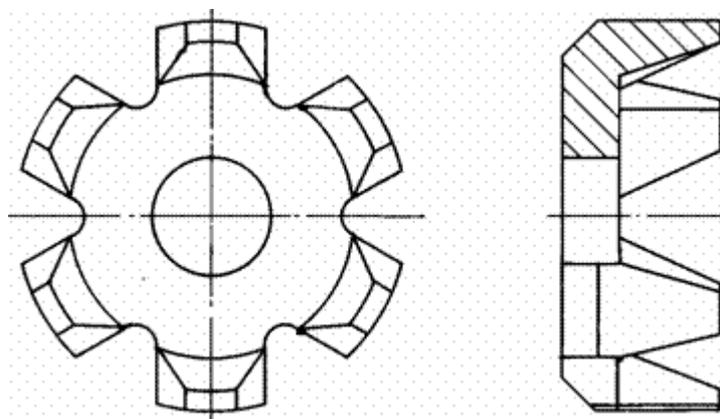


Рис. 8.9. Клювообразный полюсный наконечник (6-ти полюсный)

На рис. 8.10 приведена конструктивная схема магнитной системы и обмоток генератора (продольный и поперечный разрез). При подаче постоянного напряжения на щетки b по обмотке возбуждения 2 протекает постоянный ток возбуждения I_B . На рис. 8.10 знаком «•» обозначен ток возбуждения, текущий на нас, знаком «+» - ток, текущий от нас. Ток возбуждения вызывает магнитный поток Φ , направленный по оси генератора. Силовая линия магнитного потока возбуждения показана

пунктирной линией, а направление потока - стрелками. Здесь так же обозначено: 1 – втулка; 2 – обмотка возбуждения; 3 – клювообразные полюсные наконечники; 4 – пакет якоря; 5 – обмотка якоря; 6 – щетки; 7 - контактные кольца; 8 – изоляционная втулка; 9 – вал. Возникший магнитный поток проходит по магнитной цепи генератора, а именно, по втулке через стык между втулкой и кольцом полюсного наконечника со стороны контактных колец по клювам полюсного наконечника, по рабочему воздушному зазору, по зубцам пакета якоря, по ярму, зубцам, рабочему зазору, через клювы и сборное кольцо полюсного наконечника со стороны противоположной контактным кольцам, через стык между сборным кольцом и втулкой возвращается на втулку. На рис. 8.10 показано, что магнитный поток выходит из клювов полюсного наконечника со стороны контактных колец и выходит в клювы полюсного наконечника с противоположной стороны, т.е. клювы одного полюсного наконечника можно считать полюсами N , а клювы другого наконечника полюсами S .

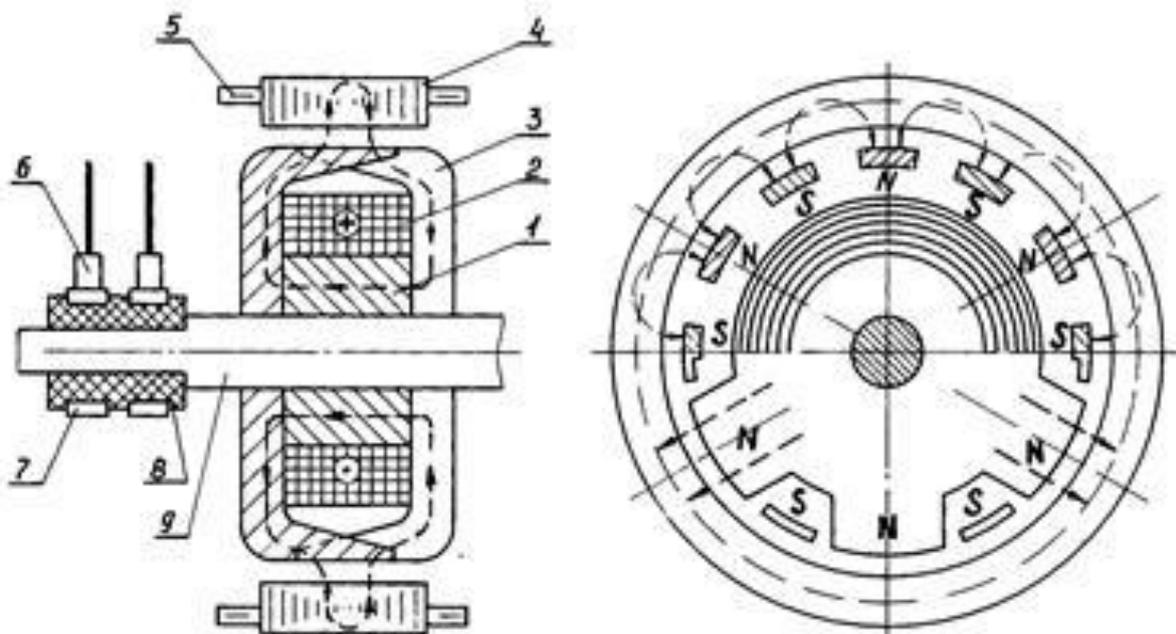


Рис. 8.10. Конструктивная схема генератора

Таким образом, в рассматриваемой выше конструкции при одной катушке возбуждения имеем многополюсный индуктор. Малое число пазов на полюс и фазу позволяет применять пакет с малым числом пазов и технологичные обмотки. В большинстве отечественных и зарубежных генераторов число полюсов ротора равно 12. На валу ротора гене-

ротора размещаются втулка с катушкой возбуждения и полюсные половинки. В последнее время полюсные половинки штампуются заодно с полувтулками, что позволяет исключить один воздушный зазор. Роторы генераторов должны быть обязательно отбалансированы. Для балансировки с полюсных половинок снимают часть металла путем высверливания или фрезерования. Пакет железа статора набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,8-1,0 мм или выполняется навивкой «на ребро» из стали 08КП. Навивка «на ребро» обеспечивает меньше отходов при обработке и высокую технологичность. При выполнении пакета железа статора навивкой снаружи статора над пазами обычно имеются выступы, по которым при навивке фиксируется положение слоев друг относительно друга. Эти выступы улучшают охлаждение статора за счет более развитой его наружной поверхности. Необходимость экономии металла привела к созданию конструкции пакета железа статора, набранного из отдельных подковообразных сегментов. Скрепление между собой отдельных листов пакета статора в монолитную конструкцию осуществляется сваркой или заклепками.

В пазах статора размещается трёхфазная обмотка. Число пазов может быть различным при одном и том же числе полюсов ротора и определяется типом трёхфазной обмотки и электрическими характеристиками генератора. В открытых пазах (рис. 8.11, *а*) витки обмотки удерживаются клиньями из изоляционного материала.

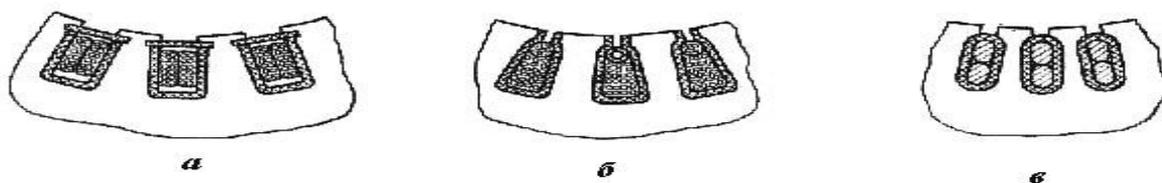


Рис. 8.11. Вид пазов статора

а – открытые; *б* – полузакрытые; *в* – полузакрытые для одновитковых катушек

В полузакрытых пазах (рис.8.11, *б*) провода обмотки при многовитковых катушках закрепляют клиньями из изоляционного материала, а если катушка обмотки статора одновитковая, то размеры паза подбирают таким образом, что закрепления проводов в пазу не требуется (рис.8.11, *в*). Фазы обмотки якоря соединяются в звезду или в треугольник. Ниже приведены некоторые схемы укладки витков обмотки якоря генератора. Схему обмотки якоря по типу одинарной звезды можно использовать для генераторов с числом пазов на полюс и фазу

0,5; 1 и 2. Каждая фаза петлевой обмотки содержит 6 непрерывно намотанных катушек (рис. 8.12), содержащих каждая несколько витков. На рис. 8.13 представлена волновая обмотка якоря. Половина витков обмотки фазы наматывается в одну сторону, а вторая половина – в другую. Фазы обмотки, изображённой на рис. 8.14 и 8.15, соединены в двойную звезду.

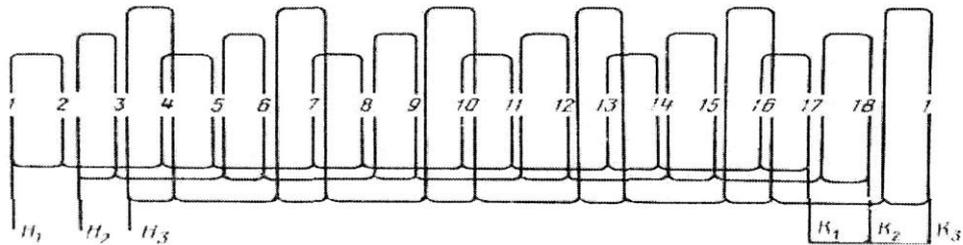


Рис. 8.12. Обмотка якоря при соединении фаз в звезду
 $Z = 18$: H_1, H_2, H_3 – начало фаз; K_1, K_2, K_3 – концы фаз

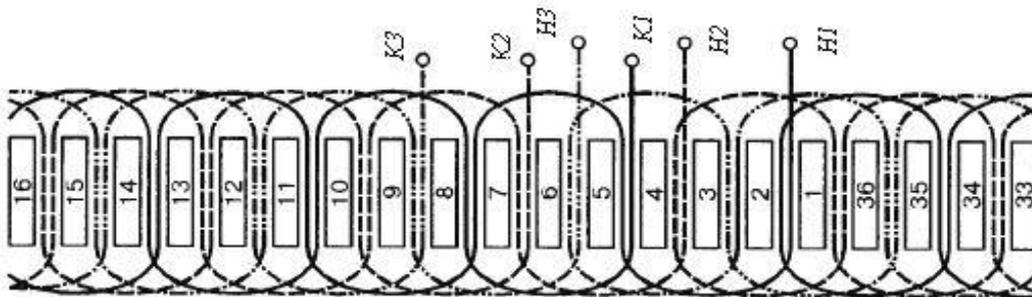


Рис. 8.13. Волновая обмотка якоря при соединении фаз в звезду
 $Z = 36$: H_1, H_2, H_3 – начала фаз; K_1, K_2, K_3 – концы фаз

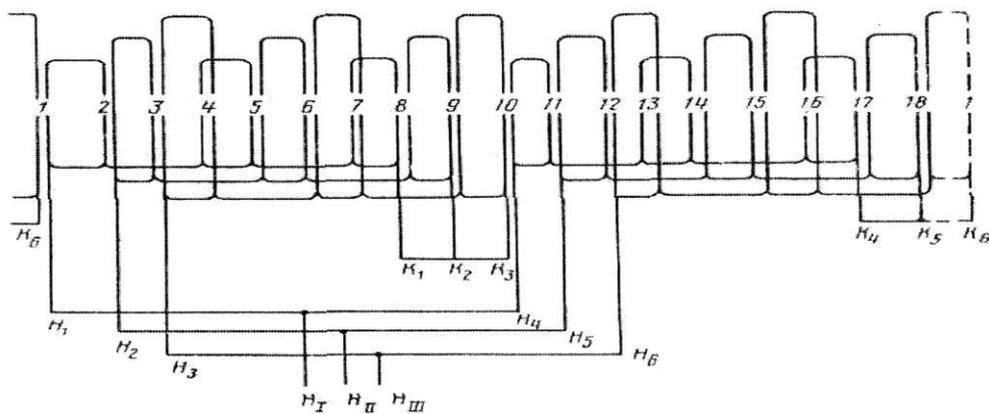


Рис. 8.14. Соединение обмоток фаз якоря в двойную звезду
 $Z = 18$: $H_1, H_2, H_3, K_1, K_2, K_3$ – начала и концы фаз первой звезды; $H_4, H_5, H_6, K_4, K_5, K_6$ – начала и концы фаз второй звезды; H_I, H_{II}, H_{III} – выводы фаз обмоток якоря

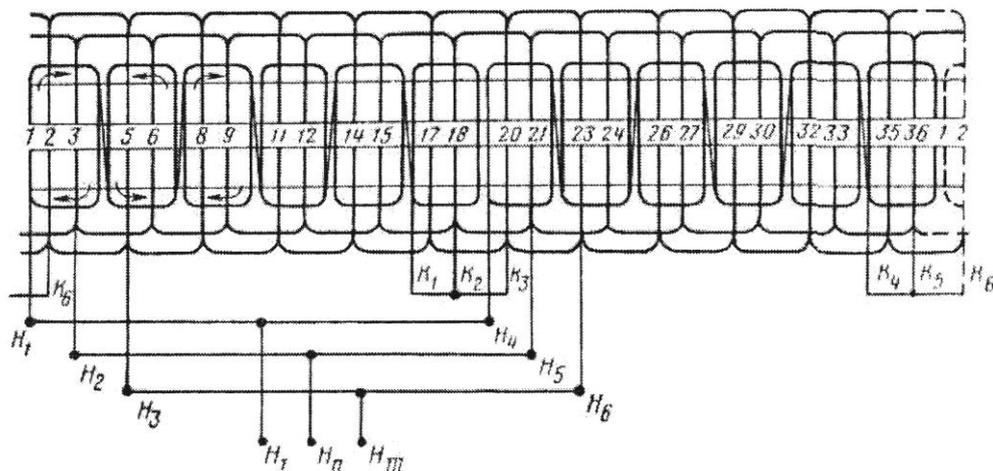


Рис. 8.15. Соединение обмоток якоря в двойную звезду с намоткой «В развал» $Z = 18$: $H_1, H_2, H_3, K_1, K_2, K_3$ – начало и концы фаз первой звезды; $H_4, H_5, H_6, K_4, K_5, K_6$ – начала и концы фаз второй звезды; H_7, H_8, H_9 – выходы фаз обмоток якоря

Для повышения отдаваемой мощности генератора на большой скорости движения автомобиля и сохранения начала токоотдачи на малой скорости на статоре генераторов размещают 2 самостоятельные трёхфазные обмотки, соединённые в звезду и имеющие различное число витков или разное сечение провода. На рис. 8.16, а показана схема соединений обмоток такого генератора.

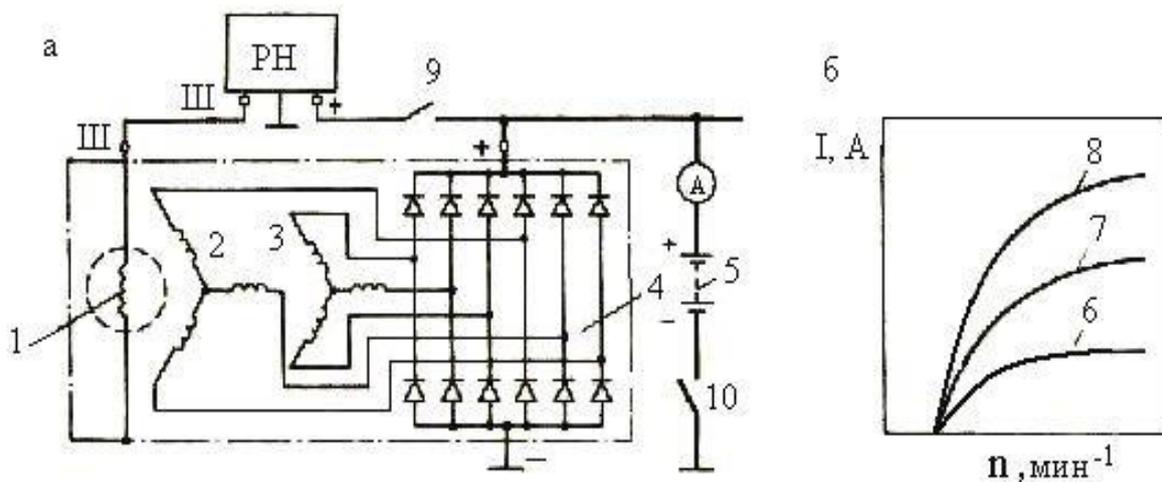


Рис. 8.16. Схема соединений генераторной установки двумя обмотками якоря

Здесь обозначено: 1 – обмотка возбуждения генератора; 2 – первая трёхфазная обмотка; 3 – вторая трёхфазная обмотка; 4 – блок выпрямителей; 5 – аккумуляторная батарея; 6 – токоскоростная характери-

стика обмотки 2; 7 – токоскоростная характеристика обмотки 3; 8 – токоскоростная характеристика генератора; 9 – выключатель зажигания; 10 – выключатель массы. Обмотка якоря 2 намотана проводом меньшего сечения, чем обмотка 3, и имеет большее число витков. Обмотка 3, наоборот, имеет меньше витков и намотана из более толстого провода. Каждая обмотка присоединена к своему комплекту диодов 4, которые имеют общие плюсовые и минусовые выводы. Эта схема соединения обмоток позволяет обеспечить достаточно большую мощность генератора и сохранить малую частоту вращения начала токоотдачи.

При малой частоте вращения коленчатого вала двигателя в генераторе работает обмотка 2 с большим числом витков и обеспечивает потребителей электроэнергией. При движении автомобиля с большой скоростью вступает в работу обмотка 3 и электроэнергия потребителям поступает от двух обмоток: от обмотки 2 примерно 1/3 и от обмотки 3 примерно 2/3 общей величины электроэнергии. На рис. 8.16, б показаны токоскоростные характеристики обмоток 2 и 3 и результирующая токоскоростная характеристика обеих обмоток.

Свойства автомобильного генератора переменного тока определяются рядом характеристик, связывающих между собой следующие основные величины: фазное U_{ϕ} , линейное $U_{\text{л}}$ и выпрямленное U_d напряжения; фазный ток I_{ϕ} ; выпрямленный ток I_d нагрузки генератора; ток возбуждения $I_{\text{в}}$ генератора; частота вращения n ротора генератора. Характеристики генератора представляют собой зависимость между двумя какими-либо величинами при неизменных значениях остальных величин. Основными характеристиками автомобильного генератора считаются:

- характеристика холостого хода – зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения $E=f(I_{\text{в}})$ при постоянной частоте вращения и токе нагрузки I_d , равном нулю;
- внешняя характеристика – зависимость выпрямленного напряжения генератора U_d от тока нагрузки I_d при постоянной частоте вращения ротора n и определенном значении тока возбуждения $I_{\text{в}}$;
- токоскоростная характеристика – зависимость тока нагрузки I_d генератора от частоты вращения ротора генератора n при неизменных значениях выпрямленного напряжения U_d на зажимах генератора и тока возбуждения генератора $I_{\text{в}}$.

Автомобильные генераторы приводятся во вращение от двигателя внутреннего сгорания с постоянным передаточным отношением

привода, поэтому частота вращения ротора генератора может изменяться от минимального значения, соответствующего частоте вращения коленчатого вала в режиме холостого хода автомобильного двигателя, до максимального значения, соответствующего максимальной скорости движения автомобиля.

Отношение минимальной и максимальной частот вращения ротора генераторов может составлять 1: 12 для автомобилей с карбюраторными двигателями и 1: 4 для автомобилей с дизельными двигателями. Поэтому характеристики автомобильных генераторов в противоположность общепромышленным генераторам определяют не при одном значении частоты вращения n , а при различных значениях, покрывающих весь диапазон изменения частоты вращения от минимальной до максимальной.

Характеристика холостого хода для различных частот вращения выражается семейством характеристик (рис. 8.17), на которых ЭДС холостого хода пропорциональна частоте вращения n , так как при заданном значении тока возбуждения I_B магнитный поток в воздушном зазоре не зависит от частоты вращения. По характеристике холостого хода определяется начальная частота вращения ротора генератора, при которой напряжение генератора достигает номинальной величины.

На практике характеристику холостого хода определяют или по величине фазной ЭДС E_ϕ , или по линейному значению ЭДС E_d или иногда по значению выпрямленного напряжения холостого хода U_d , практически равного для трехфазной двухполупериодной схемы выпрямления $U_d = (2,0 - 2,15) E_\phi$.

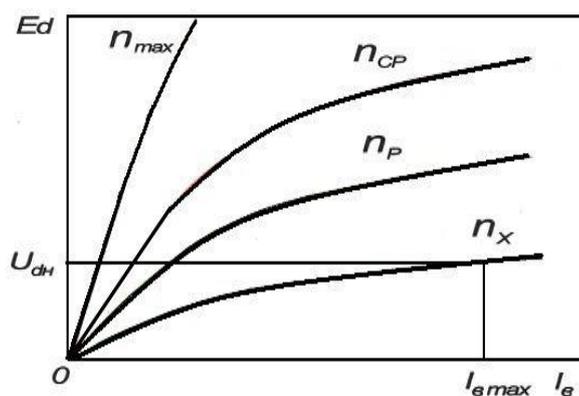


Рис. 8.17. Семейство характеристик холостого хода при различных частотах вращения ротора генератора

Внешняя характеристика автомобильного генератора также выражается семейством кривых, соответствующих различным частотам вращения ротора генератора (рис. 8.18).

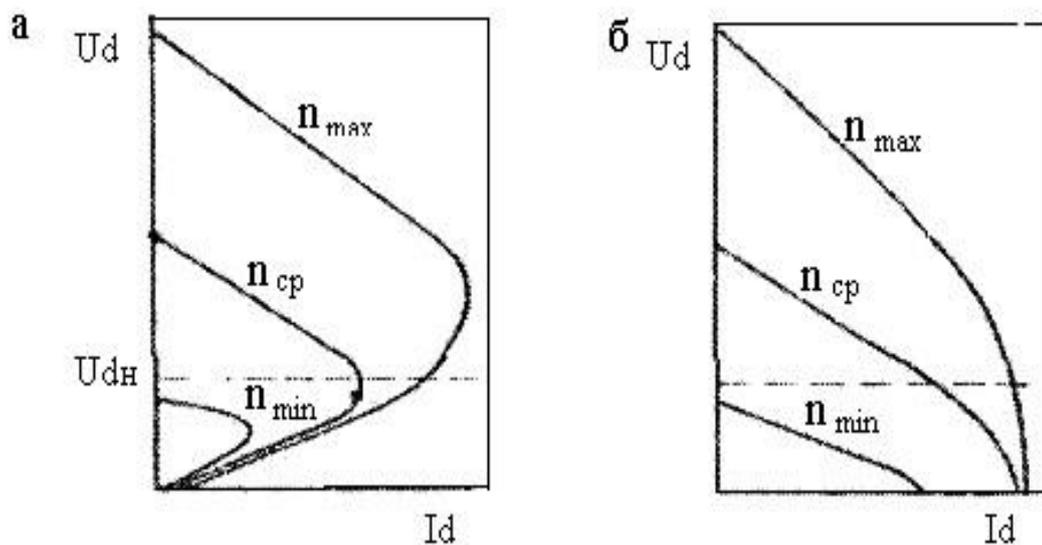


Рис. 8.18. Семейство внешних характеристик автомобильного генератора при различных частотах вращения ротора: а – при самовозбуждении; б – при независимом возбуждении

Снижение напряжения при увеличении нагрузки автомобильного генератора происходит из-за падения напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях обмоток статора, размагничивающего действия магнитного потока реакции якоря, уменьшающего магнитный поток в воздушном зазоре и из-за падения напряжения в цепи выпрямителя. Внешние характеристики могут определяться при самовозбуждении или при независимом возбуждении. Схемы соединения для определения внешних характеристик показаны на рис. 8.19 и 8.20. Внешние характеристики при самовозбуждении определяются по схеме, показанной на рис. 8.19. Каждая характеристика определяется при неизменном значении частоты вращения генератора и неизменном сопротивлении цепи возбуждения. Верхняя ветвь внешней характеристики (см. рис. 8.18, а) соответствует устойчивой работе генератора, когда при уменьшении сопротивления нагрузочного реостата напряжение генератора падает медленнее, чем сопротивление, и ток генератора возрастает. Нижняя ветвь внешней характеристики соответствует неустойчивой работе генератора.

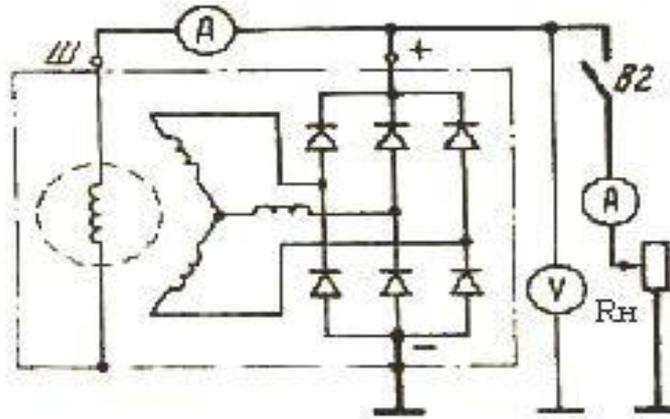


Рис. 8.19. Электрическая схема соединения для определения семейства внешних характеристик при самовозбуждении

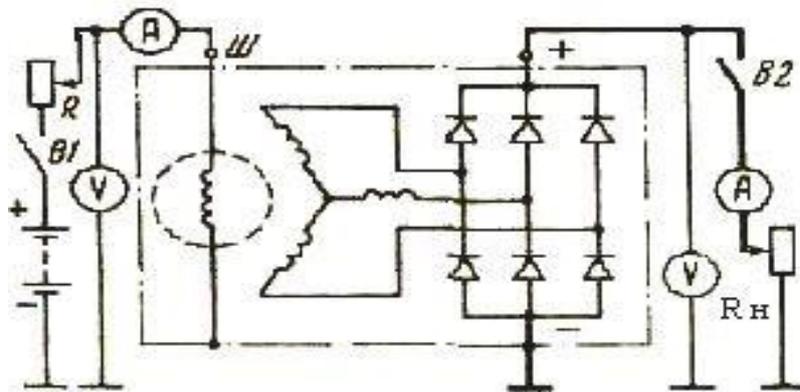


Рис. 8.20. Электрическая схема соединения для определения семейства внешних характеристик при независимом возбуждении

Из семейства внешних характеристик, определенных при самовозбуждении, определяется, как правило, величина максимального тока, которая обеспечивается при заданном номинальном или регулируемом значении напряжения. Семейство внешних характеристик, определенных по схеме независимого возбуждения, изображено на рис. 8.18, б. Каждая характеристика снимается при определенных значениях частоты вращения ротора генератора и напряжения постоянного тока, подводимого к обмотке возбуждения, что соответствует определенному значению тока возбуждения генератора.

В отличие от внешних характеристик, определенных при самовозбуждении, ток короткого замыкания генератора при независимом возбуждении больше номинального тока нагрузки и имеет максимальную величину при максимальной частоте вращения. Значение тока

нагрузки, определяемое при независимом возбуждении, больше значения тока нагрузки, определяемого по схеме самовозбуждения, на величину тока возбуждения.

Токоскоростная характеристика генератора также может определяться при независимом возбуждении или при самовозбуждении, однако основное практическое значение имеет характеристика, снятая при самовозбуждении. Электрические схемы соединений генератора для определения токоскоростных характеристик те же, что и для внешних характеристик.

Токоскоростная характеристика генератора $I_d=f(n)$ имеет значительную кривизну (рис. 8.21), так как с увеличением частоты вращения ротора n отдаваемый генератором ток I_d растет все медленнее. Это объясняется тем, что с увеличением частоты вращения ротора генератора увеличивается индуктивное сопротивление обмотки якоря генератора пропорциональное квадрату числа витков в фазе. Вследствие этого с увеличением частоты вращения ток генератора увеличивается медленнее, асимптотически стремясь к некоторому предельному значению.

При замыкании внешней цепи на сопротивление нагрузки индуктированная в обмотке статора ЭДС E вызывает ток:

$$I_d = \frac{E}{\sqrt{(r+R)^2 + x^2}}, \quad (8.3)$$

где r – активное сопротивление обмоток статора; R – сопротивление нагрузки; x – индуктивное сопротивление обмотки якоря генератора.

$$x = 2\pi fL = 2\pi \frac{pn}{60} L = C_y n;$$

$$E = 4,44k\omega f\Phi_\delta = 4,44k\omega \frac{pn}{60} \Phi_\delta = C_x n\Phi_\delta. \quad (8.4)$$

где C_y и C_x – постоянные величины.

Подставляя в уравнение тока значения E и x , получим:

$$I_d = \frac{C_x n\Phi_\delta}{\sqrt{(r+R)^2 + C_y^2 n^2}}. \quad (8.5)$$

При малой частоте вращения ротора величина $C_y^2 n^2$ мала по сравнению с $(r+R)^2$ и ею можно пренебречь, тогда:

$$I_d = \frac{C_x \Phi_\delta}{\sqrt{(r+R)^2}} n = \frac{C_x \Phi_\delta}{r+R} n. \quad (8.6)$$

Как видно из формулы, ток при малой частоте вращения растет пропорционально частоте вращения (начальная часть характеристики на рис. 1.20). При возрастании частоты вращения возрастает величина $C_y^2 n^2$ и при максимальной частоте вращения можно пренебречь значением $(r+R)^2$; тогда ток будет равен:

$$I_d = \frac{C_x \Phi_\delta}{\sqrt{(r+R)^2 + C_y^2 n^2}} = \frac{C_x \Phi_\delta}{C_y}, \quad (8.7)$$

т.е. ток будет равен какой-то постоянной величине, определяемой параметрами обмоток генератора и величиной магнитного потока холостого хода и не зависящей от n .

В зависимости от способа ограничения тока генератора различают два вида токоскоростных характеристик: с ограничителем тока в схеме регулирования напряжения генератора и с самоограничением тока генератора. В первом случае, когда предельное значение тока генератора при большой частоте вращения больше, чем допустимо по нагреву, выпрямленный ток ограничивается автоматически посредством отдельного элемента – ограничителя тока, входящего в регулирующее устройство (рис. 8.21, а). Но это ведет к усложнению конструкции регулирующего устройства, что нежелательно по технико-экономическим и эксплуатационным соображениям. Для исключения из конструкции регулирующего устройства ограничителя тока, число витков обмотки статора увеличивают и подбирают таким образом, чтобы при увеличении частоты вращения ротора предельное значение тока не превышало допустимой по нагреву величины (рис. 8.20, б). Тогда ограничитель тока становится излишним. Так генератор приобретает свойство самоограничения, отдаваемого им в нагрузку тока. Все современные автомобильные генераторы выполняются с самоограничением тока и имеют токоскоростную характеристику, соответствующую рис. 8.21, б. Также, различают токоскоростные характеристики в так называемом «холодном» и «горячем» состоянии генератора, которые экспериментально определяют следующим образом. Генератор устанавливают на стенде, имеющем электрический двигатель для привода ротора генератора, и приборы, соединенные по схеме, приведенной на рис. 8.19 или 8.20.

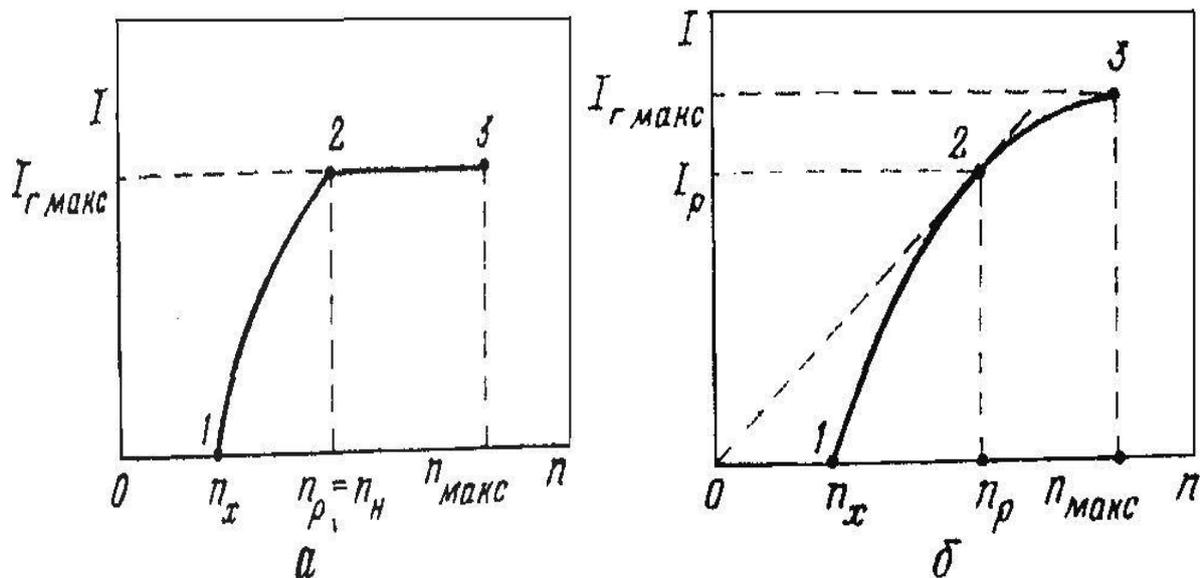


Рис.8.21. Токоскоростные характеристики автомобильного генератора
а – с ограничителем тока в схеме регулирования; б – с самоограничением тока

В случае определения характеристики по схеме рис.8.20 (независимого возбуждения) сначала включают выключатель $B1$ и реостатом устанавливают напряжение возбуждения, равное номинальной величине (т. е. 14 или 28 В). После этого плавно приводят во вращение ротор генератора и тахометром или частотометром определяют начальную частоту вращения в режиме холостого хода, при которой выпрямленное напряжение достигает величины 14 или 28 В. Затем включают рубильник $B2$ и снимают характеристику, увеличивая частоту вращения и подбирая на каждой частоте вращения такое положение реостата нагрузки R_n , чтобы выпрямленное напряжение было равно номинальному напряжению 14 или 28 В. Характеристика, снятая таким образом, соответствует «холодному» состоянию. Для определения токоскоростной характеристики в «горячем» состоянии генератор в комплекте с регулирующим устройством должен предварительно проработать на стенде в режиме нагрузки расчетным током при частоте вращения 3000–3500 об/мин в течение 1,5–2 ч, после чего снятие характеристик производится так же, как описано выше. Под расчетным током I_{dp} , величина которого определяет размеры и массу генератора, подразумевают: в случае применения в схеме регулирования ограничителя тока – максимальный ток генератора, ограничиваемый ограничителем тока; в генераторе с самоограничением – величину тока нагрузки, равную примерно $2/3$ от максимальной величины тока самоограничения генератора. Частоту вращения ротора генератора, соответствующую расчетному току нагрузки, называют расчетной частотой вращения n_p , а

режим работы генератора при расчетном токе I_{dp} и расчетной частоте вращения n_p – расчетным режимом (или режимом максимального момента).

Параметры I_{dp} и n_p , характеризующие расчетный режим генератора с самоограничением тока, можно определить, проведя из начала координат касательную к токоскоростной характеристике (см. рис. 8.21, б). Тогда точка касания определяет величины I_{dp} и n_p .

Автомобильные генераторы рассчитаны таким образом, что узлы и детали генератора выдерживают тепловую нагрузку, соответствующую любому режиму его работы. Поэтому на табличке генератора обозначают наряду с номинальной величиной напряжения (14 или 28 В) величину максимального тока нагрузки генератора. В случае применения ограничителя тока эта величина равна току, на который установлен ограничитель, а в случае генератора с самоограничением отдаваемого тока – максимальному току самоограничения. Максимальная мощность генератора переменного тока определяется по соотношению:

$$P_{\Gamma \max} = U_{dn} * I_{\Gamma \max}, \quad (8.8)$$

где U_{dn} – номинальное выпрямленное напряжение, равное по ГОСТ Р 52230-2004, соответственно 14 или 28 В; $I_{\Gamma \max}$ – ток нагрузки генератора в максимальном режиме. Генераторы с номинальным напряжением 14 и 28 В предназначены для работы соответственно в системе электроснабжения автомобиля напряжением 12 и 24 В. В технических условиях на генераторы, как правило, указывают следующие параметры токоскоростной характеристики генераторов в «холодном» и «горячем» состояниях: начальную частоту вращения в режиме холостого хода n_x ; расчетную частоту вращения ротора генератора n_p ; максимальную частоту вращения ротора генератора n_{max} ; максимальный ток нагрузки генератора I_{dmax} .

8.3. Бесколлекторный привод дроссельной заслонки автомобиля

Основная функция дроссельной заслонки — подача и регулирование потока воздуха, необходимого для образования топливовоздушной смеси в двигателе автомобиля. От корректной работы заслонки зависит стабильность режимов работы двигателя, уровень расхода топлива и характеристики автомобиля в целом. При электронном приводе аксе-

латора перемещение дроссельной заслонки осуществляется при помощи электродвигателя, без традиционной механической связи между педалью акселератора и дроссельной заслонкой. Положение педали отслеживается датчиками, и соответствующие сигналы передаются в блок управления, где обрабатывается и передается на исполнительный механизм перемещения дроссельной заслонки. Благодаря такой системе блок управления может посредством перемещения дроссельной заслонки влиять на величину крутящего момента двигателя даже в том случае, когда водитель не меняет положения педали акселератора. Это позволяет достигать лучшей координации между системами двигателя.

Электронный привод дроссельной заслонки состоит из:

- педального модуля
- модуля дроссельной заслонки
- корпуса дроссельной заслонки
- блока управления двигателем
- контрольной лампы электронного привода дроссельной заслонки

Педальный модуль (рис.8.22) посредством датчиков непрерывно определяет положение педали акселератора и передает соответствующий сигнал блоку управления двигателя. Он состоит из:

- педали акселератора
- датчика 1 положения педали акселератора
- датчика 2 положения педали акселератора

Два одинаковых датчика используются для обеспечения надежной работы системы, но для работы системы достаточно работоспособности одного датчика. Оба датчика представляют собой потенциометры со скользящим контактом, укрепленным на общем валу. При каждом изменении положения педали изменяется сопротивление датчиков и, соответственно, напряжение, которое передается на блок управления двигателя. Используя сигнал от обоих датчиков положения педали акселератора блок управления двигателя узнает положение педали в каждый момент времени. Разновидностью педального модуля является бесконтактный модуль с индукционными катушками.

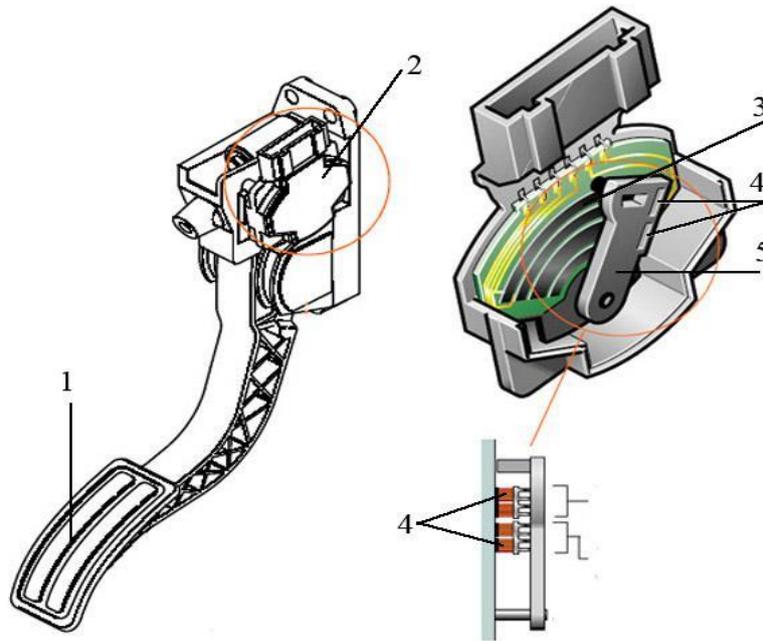


Рис. 8.22. Педальный модуль

1 - педаль; 2 - корпус модуля педали акселератора; 3 – контактная дорожка; 4 – датчики; 5 - рычаг

На общей многослойной плате предусмотрены одна катушка возбуждения и три приемные катушки для каждого чувствительного элемента, а также электронные элементы обработки сигналов и управления датчиком. Ромбовидные приемные катушки расположены со смещением относительно друг друга, благодаря чему создается сдвиг фаз индуцируемого в них тока. Над приемными катушками находятся катушки возбуждения. На механизме педали закреплена металлическая шторка, который перемещается при движении педали вдоль платы на минимальном расстоянии от нее. Катушка возбуждения запитывается переменным током. В результате возникает переменное электромагнитное поле, действующее на металлическую шторку. При этом в шторке индуцируется ток, который в свою очередь создает вокруг нее свое, вторичное, переменное электромагнитное поле. Оба поля, созданные катушкой возбуждения и металлической шторкой, действуют на приемные катушки, создавая на их выводах соответствующее напряжение. В то время как собственное поле шторки не зависит от ее положения, индуцируемый в приемных катушках ток, изменяется при перемещении шторки относительно них (Рис.8.23). При перемещении шторки изменяется степень перекрытия ею той или иной приемной катушки и соответственно меняется амплитуда напряжения на ее выводах. Переменные напряжения на выводах катушек преобразуются затем в электронной схеме датчика в сигналы постоянного

напряжения, усиливаются и сравниваются друг с другом. Обработка завершается созданием линейного напряжения, подаваемого на выводы датчика.

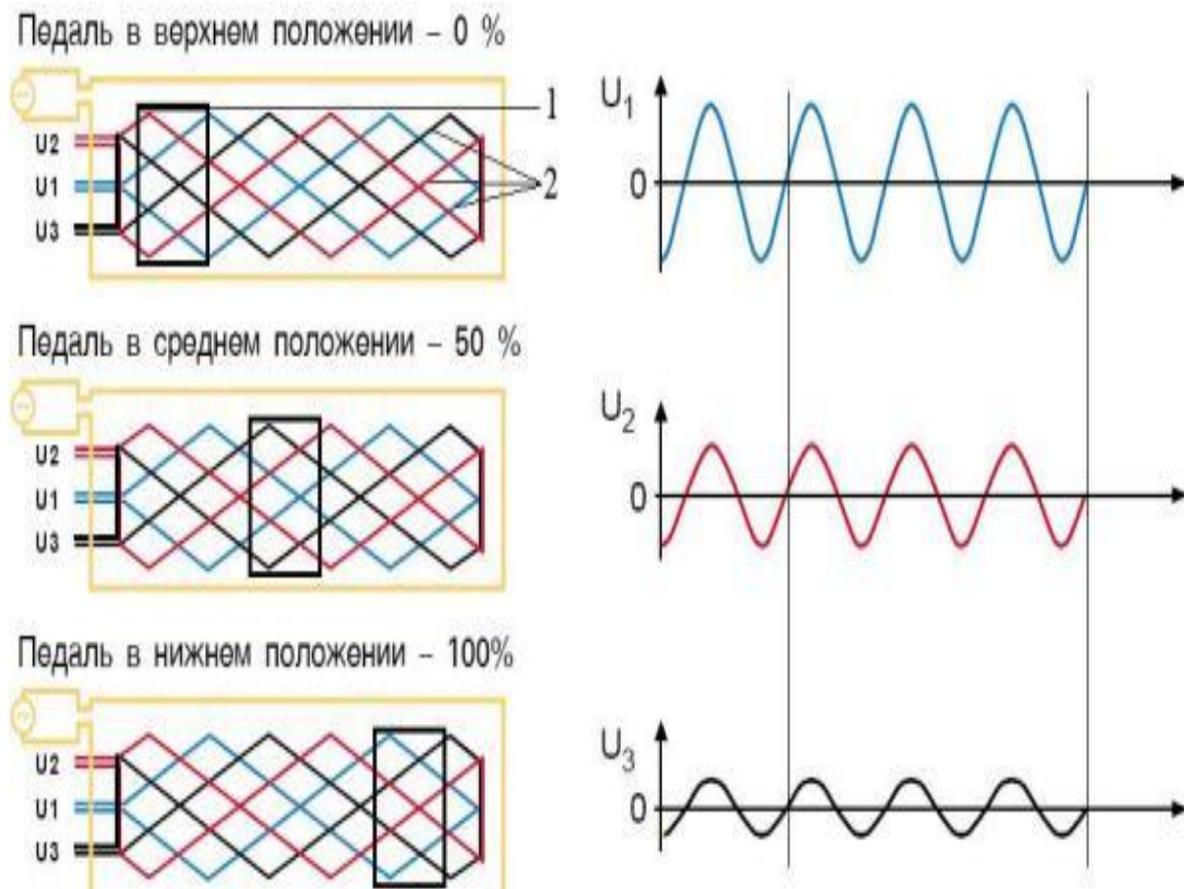


Рис. 8.23. Изменение напряжения при перемещении заслонки
1 – шторка; 2 – приемные катушки

Преимуществом модуля является отсутствие контактов, что повышает надежность системы.

Модуль управления дроссельной заслонки расположен на впускном трубопроводе и служит для обеспечения подачи нужного количества воздуха в цилиндры. Модуль управления дроссельной заслонки обеспечивает необходимую массу воздуха, поступающего в цилиндры. Модуль состоит из (см. рис 8.24):

- корпуса дроссельной заслонки 1
- дроссельной заслонки 7
- привода дроссельной заслонки

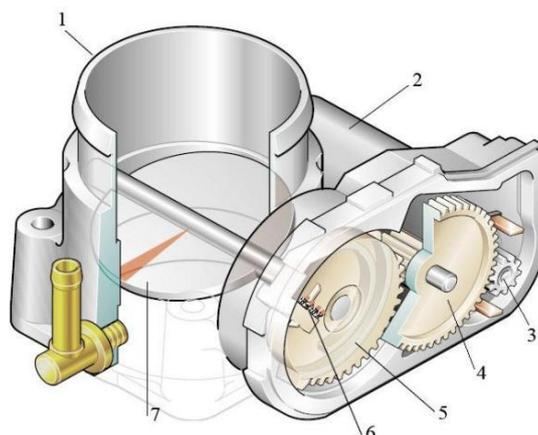


Рис. 8.24. Модуль управления дроссельной заслонки

1 – корпус дроссельной заслонки; 2 – электропривод дроссельной заслонки; 3 – шестерня привода; 4 – промежуточная шестерня; 5 – шестерня пружинного возвратного механизма; 6 – угловые датчики привода дроссельной заслонки; 7 – дроссельная заслонка

Схема управления дроссельной заслонкой приведена на рис.8.25.

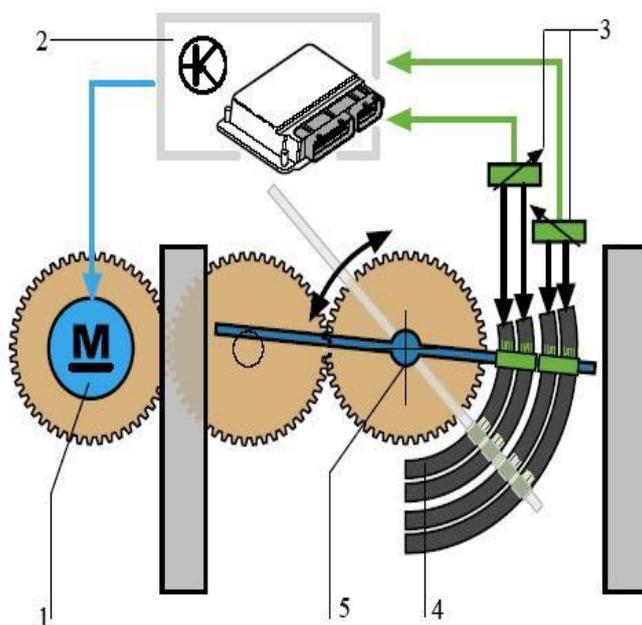


Рис. 8.25. Схема управления дроссельной заслонкой

1 – электропривод; 2 – блок управления двигателем; 3 – угловые датчики управления дроссельной заслонкой; 4 – дорожки потенциометров; 5 – дроссельная заслонка

Привод дроссельной заслонки воздействует на дроссельную заслонку в соответствии с командами блока управления двигателем 2. Положение дроссельной заслонки отслеживается с помощью двух датчиков 3, представляющих собой потенциометры со скользящим контак-

том. Скользящие контакты укреплены на шестерне 5, которая установлена на валике дроссельной заслонки. Контакты касаются дорожек потенциометров в крышке корпуса. При изменении положения дроссельной заслонки изменяются сопротивления дорожки потенциометров и, тем самым, сигнальные напряжения, которые передаются блоку управления двигателя 1.

В современных приводах дроссельной заслонки используются бесколлекторные вентильные двигатели постоянного тока (Рис.8.26) и шаговые двигатели. Бесколлекторные серводвигатели постоянного тока выходят в диапазоне мощностей от 0,03 до 400 Ватт диаметром от 6 до 90 мм. В семейство двигателей входят как серии традиционных бесколлекторных двигателей, так и серии со встроенным датчиком Холла и плоские двигатели.

При производстве двигателей используются современные технологии и разработки: полый ротор, усиленные подшипники, схемы электронной коммутации, магниты с улучшенными характеристиками (Nd2Fe14B). Двигатели данного семейства отличают такие качества, как высокие скорости вращения (до 100000 об/мин), малая постоянная времени, линейность рабочих характеристик, большой ресурс, высокие возможности управления.

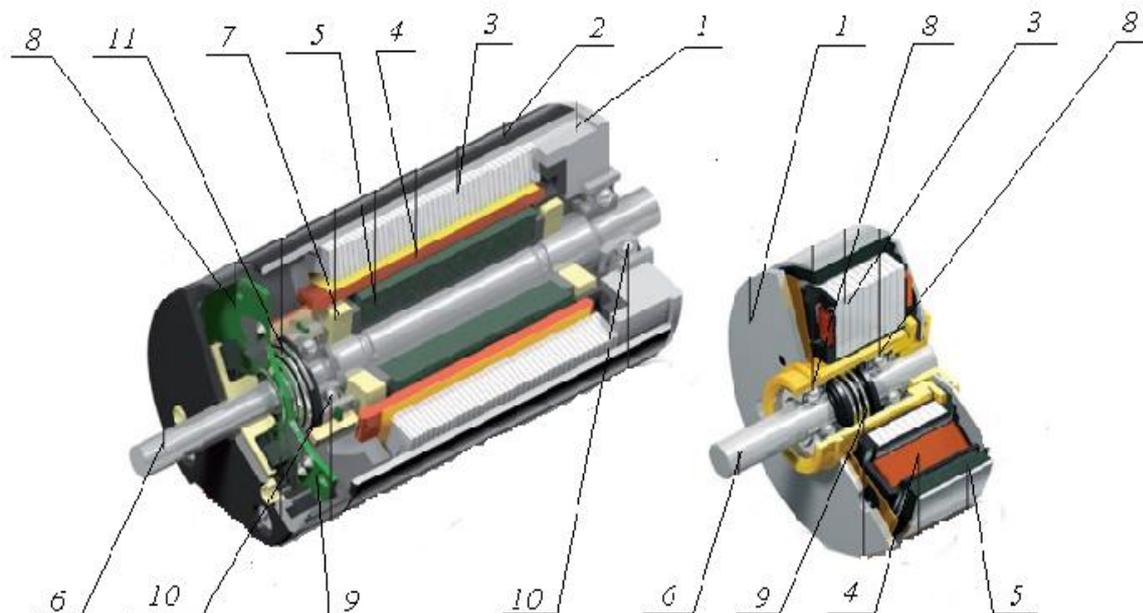


Рис. 8.26. Конструкция бесколлекторного двигателя постоянного тока

1 - Фланец, 2 - Корпус, 3 - Пакет из ламинированного стального листа, 4 - Обмотка, 5 - Постоянный магнит, 6 - Вал, 7 - Балансировочный диск, 8-Плата с датчиками Холла, 9-Управляющий магнит, 10- Шарикоподшипник, 11- Пружина предварительного натяга подшипника.

В основе работы двигателя лежит синхронный принцип действия (синхронное изменение ЭДС и скорости). Ротор (вращающаяся часть) — это постоянный магнит, закрепленный на двухконцевом вале. Статор (неподвижная часть) включает корпус, изготовленный из стали или алюминия, и обмотку двигателя (3 фазы с 3 обмотками, объединенными либо в «звезду», либо в «треугольник»). Когда к обмоткам приложено напряжение, сдвинутое друг относительно друга на 120° , в статоре генерируется вращающееся поле. Поскольку ротор — это активный элемент, то магнит всегда стремится занять своё положение по линии магнитного поля. Таким образом, переключая линии магнитного поля, получим вращение ротора. На вале двигателя стоит датчик положения ротора (датчик Холла), с ним по принципу обратной связи соединён коммутатор (любой контроллер или сервоусилитель), управляющий ключами силового каскада усиления мощности (транзисторами), к которым подключены обмотки двигателя. В зависимости от угла поворота коммутатор переключает транзисторы. Так происходит последовательное переключение обмоток, дающее вращение ротора двигателя. Коммутатор и датчик Холла — это аналог щеточно-коллекторного узла классического мотора. Схема управления содержит полумостовую схему включения каждого из трех выводов обмоток. Существуют два основных организации обратных связей в бесколлекторных двигателях: с датчиками и без датчиков (рис.8.27).

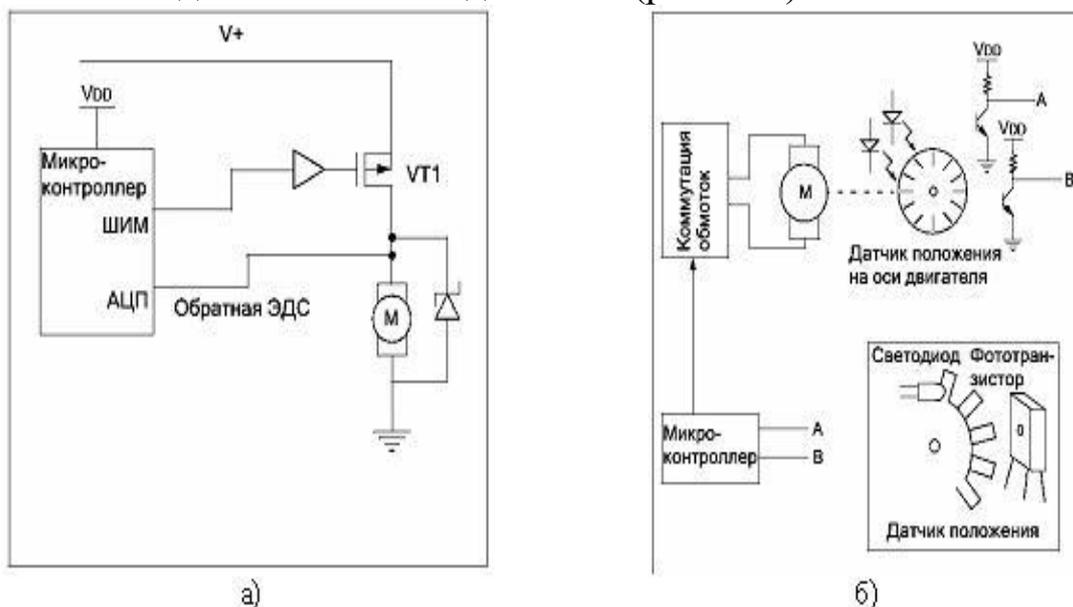


Рис. 8.27. Измерение положения ротора и скорости вращения двигателя

а- без датчика с использованием обратной ЭДС;

б- с использованием датчика положения

В моторах без датчика положение ротора определяется по величине ЭДС, возникающей в неподключенной обмотке. Моторы без датчиков проще в изготовлении, но сложнее в управлении. Их применяют в задачах, не требующих частых запусков и остановок. Моторы с датчиками – лучший выбор для задач, связанных с периодическими остановками и запусками.

Основные схемы управления двигателем приведены на рис.8.28. Во многих приводах поворота заслонки используется синхронный шаговый двигатель. Описание шагового двигателя, особенности его работы и управления приведены в разделе 6.1. Отличительная особенность шаговых двигателей – это возможность осуществлять позиционирование без датчика обратной связи по положению.

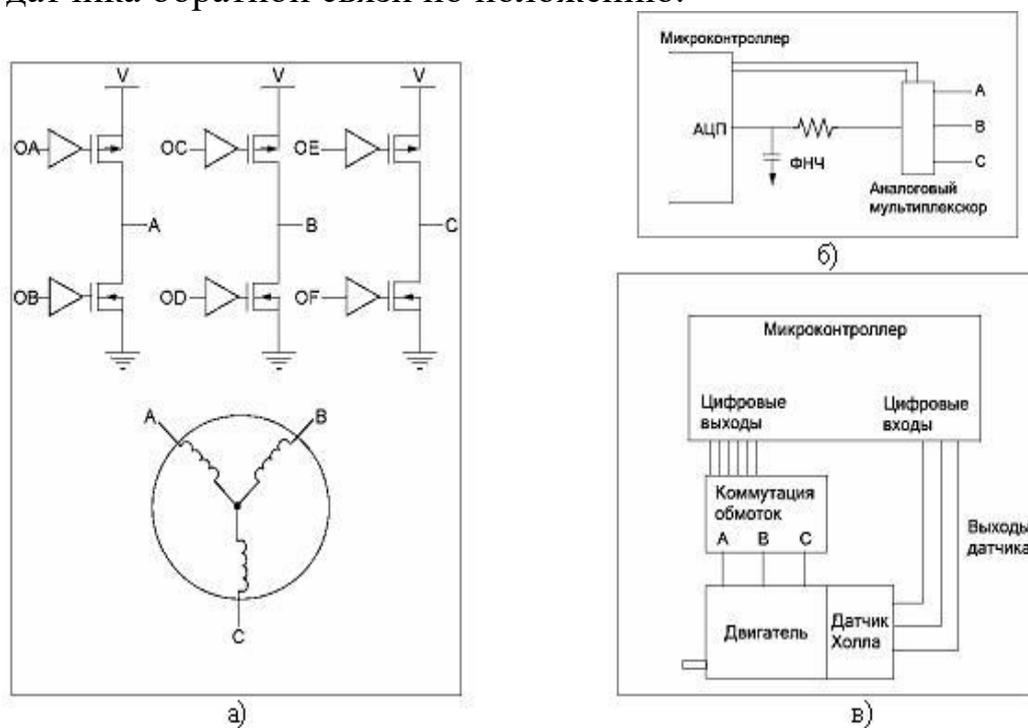


Рис. 8.28. Управление бесколлекторным двигателем постоянного тока

а- общая схема включения; б- схема включения без датчика положения; в - схема включения с датчиком положения

Блок управления двигателем привода заслонки определяет по сигналам намерение водителя увеличить или уменьшить мощность двигателя, суммируя внешние и внутренние требования к крутящему моменту и по ним рассчитывает необходимую величину момента и соответственно этому изменяет его. Крутящий момент определяется расчетом

по частоте вращения двигателя, сигналу о нагрузке двигателя и моменту зажигания, при этом блок управления двигателя сначала сравнивает фактический крутящий момент с оптимальным моментом.

Если эти величины не совпадают, блок управления расчетом определяет направление и величину положения дроссельной заслонки в целях достижения совпадения фактического и оптимального крутящего момента. После подается управляющий сигнал приводу дроссельной заслонки для приоткрытия ее или, наоборот, некоторого закрытия, например, в случае включения дополнительного потребителя - компрессора климатической установки.

Контрольная лампа электронного привода акселератора сигнализирует водителю, что в системе электронного привода имеется неисправность.

Вопросы для самопроверки к главе 8:

1. Назовите основные схемы выполнения тягового электропривода.
2. Какие преимущества дает применение в тяговом электроприводе синхронного двигателя?
3. Дайте сравнительную оценку использования в тяговом электроприводе одного и двух двигателей.
4. Какие преимущества имеет привод электромобиля с мотор – колесами?
5. Что представляет собой автомобильный вентильный генератор?
6. Для чего служит клювообразный полюсный наконечник в автомобильном генераторе?
7. Как проходит магнитный поток в конструкции вентильного генератора?
8. Назовите виды пазов статора генератора.
9. Назовите виды укладки обмотки статора.
10. Назовите основные характеристики автомобильного генератора.
11. Что такое токоскоростная характеристика генератора?
12. Для чего ограничивают величину тока в генераторе.
13. Опишите состав электропривода дроссельной заслонки.
14. Для чего используются датчики в приводе дроссельной заслонки?
15. Как осуществляется управление дроссельной заслонкой?
16. Какие двигатели используются в приводе дроссельной заслонки?

Глава 9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АВТОМОБИЛЯХ

9.1. Основные понятия и определения, классификация электрических аппаратов

Электрическим аппаратом (ЭА) в общем виде принято считать электротехническое устройство, применяемое при использовании электрической энергии, начиная от ее производства, передачи, распределения и кончая потреблением.

В настоящее время под ЭА понимают электротехническое устройство, которое используется для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты, управления и регулирования установок, предназначенных для передачи, преобразования, распределения и потребления потоков энергии. При этом речь может идти о потоках энергии различного вида: электрической, механической, тепловой и др. Например, потоком механической энергии от двигателя к элементам трансмиссии управлять электромагнитная муфта. Потоками тепловой энергии можно управлять при помощи электромагнитных клапанов и заслонок.

Применительно к автомобильной технике наибольшее распространение получили коммутационные ЭА. *Коммутационный аппарат* – это электрическое устройство, служащее для пропускания электрической энергии и коммутации электрической цепи. Коммутацией называют процессы сопутствующие размыканию и замыканию электрической системы, возникающие в начальные мгновения. Эти аппараты используются для управления потоками электрической энергии для изменения режимов работы, регулирования параметров, контроля и защиты электронных систем управления и их составных частей. Как правило, функции таких ЭА осуществляются посредством коммутации (включения и отключения) электрических цепей с различной частотой, начиная от относительно редких, нерегулярных значений до периодических высокочастотных, например, в импульсных регуляторах напряжения.

Учитывая мировую тенденцию увеличения числа электронных систем управления современного автомобиля, можно с уверенностью утверждать, что электрические аппараты являются важной,



Рис. 9.1. Элементы системы управления современного автомобиля

неотъемлемой частью этих систем. Именно от их надежной работы зависит безопасность автомобиля и его экологические показатели.

В автомобилях, как правило используются *аппараты низкого напряжения*. Их условно можно разделить на следующие основные виды:

аппараты управления и защиты – автоматические выключатели, контакторы, реле, пускатели электродвигателей, переключатели, предохранители, кнопки управления и другие аппараты, управляющие режимом работы оборудования и его защитой;

аппараты автоматического регулирования – стабилизаторы и регуляторы напряжения, тока, мощности и других параметров электрической энергии;

аппараты автоматики – реле, датчики, усилители, преобразователи и другие аппараты, осуществляющие функции контроля, усиления и преобразования электрических сигналов.

Следует отметить, что АНН иногда классифицируют по величине коммутируемого тока: *слаботочные (слаботочковые)* – до 10 А и *сильноточные (сильноточковые)* – свыше 10 А. При этом нижние пределы надёжно коммутируемых современными электрическими аппаратами токов достигают 10^{-9} А.

Электрические аппараты обычно являются конструктивно законченными техническими устройствами, реализующими определенные функции и рассчитанными на разные условия эксплуатации.

В основе большинства *электромеханических ЭА* лежит контактная система с различными типами приводов - ручным, электромагнитным, механическим и др. Процессы, протекающие в ЭА, определяются различными и многообразными физическими явлениями, которые изучаются в электродинамике, механике, термодинамике и других фундаментальных науках.

Классификация электрических аппаратов может быть проведена по ряду признаков: – назначению (основной выполняемой функции), – области применения, – принципу действия, – роду тока, – исполнению защиты от воздействий окружающей среды, – конструктивным особенностям и др.

Основной является классификация *по назначению*, которая предусматривает деление электрических аппаратов на следующие большие группы.

1. *Коммутационные аппараты* распределительных устройств, служащие для включения и отключения электрических цепей. Коммутация (от латинского *commutatio* — изменение) может быть дискретной (ступенчатой) или плавной (непрерывной).

2. *Ограничивающие аппараты*, предназначенные для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники). Режимы короткого замыкания и перенапряжений являются аварийными, и эти аппараты редко подвергаются наибольшим нагрузкам.

3. *Пускорегулирующие аппараты*, предназначенные для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин или каких либо других потребителей электрической энергии. К этой группе относятся контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, УПП, частотные преобразователи.

4. *Аппараты для контроля* заданных электрических или неэлектрических параметров. К этой группе относятся реле и датчики.

5. *Аппараты для измерений*. С помощью этих аппаратов цепи первичной коммутации (главного тока) изолируются от цепей измерительных и защитных приборов, а измеряемая величина приобретает стандартное значение, удобное для измерений. К ним относятся трансформаторы тока, напряжения, емкостные делители напряжения.

6. *Электрические регуляторы.* Предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону. В частности, такие аппараты служат для поддержания на неизменном уровне напряжения, тока, температуры, частоты вращения и других величин.

По *принципу работы* электрические аппараты подразделяются на *контактные* и *бесконтактные*. Первые имеют подвижные контактные части, и воздействие на управляемую цепь осуществляется путем замыкания или размыкания этих контактов. Бесконтактные аппараты не имеют коммутирующих контактов. Эти аппараты осуществляют коммутационную операцию без перемещения и разрушения его деталей, в частности путем изменения своих электрических параметров (индуктивности, ёмкости, сопротивления и т.д.).

По *воздействию оператора* контактные аппараты могут быть автоматическими и неавтоматическими. Автоматические – это аппараты, приходящие в действие от заданного режима работы цепи или машины. Неавтоматические – это аппараты, действие которых зависит только от оператора. Они могут управляться дистанционно или непосредственно.

По *характеру работы* электрические аппараты различают в зависимости от режима той цепи, в которой они установлены:

- работающие длительно,
- предназначенные для кратковременного режима работы,
- работающие в условиях повторно-кратковременной нагрузки.

По *роду тока*: постоянного и переменного.

По *величине коммутирующего тока*: слаботочные (до 5А) и сильноточные (свыше 5А).

Основные виды коммутационных аппаратов, используемых на автомобилях.

1. Выключатель – коммутационный электрический аппарат, имеющий два коммутационных положения или состояния и предназначенный для включения и отключения тока.
2. Автоматический выключатель - выключатель, предназначенный для автоматической коммутации электрической цепи.

3. Кнопочный выключатель - выключатель, приводимый в действие нажатием или вытягиванием детали, передающей усилие оператора

4. Разъединитель - контактный коммутационный аппарат, предназначенный для коммутации электрической цепи без тока или с незначительным током, который для обеспечения безопасности имеет в отключенном положении изоляционный промежуток.

5. Переключатель - контактный коммутационный аппарат, предназначенный для переключения электрических цепей.

6. Предохранитель - коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенную величину.

7. Предохранитель-выключатель - предохранитель, выполняющий функции выключателя при взаимном перемещении деталей.

8. Электрическое реле - аппарат, предназначенный производить скачкообразные изменения в выходных цепях при заданных значениях электрических воздействующих величин.

Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам, чрезвычайно разнообразны и зависят от назначения, условий применения и эксплуатации аппарата. Кроме специфических требований, относящихся к данному аппарату, все электрические аппараты должны удовлетворять некоторым общим требованиям:

1. При работе электрического аппарата в его токоведущих частях выделяется определенное количество теплоты и аппарат нагревается. Температура не должна превосходить некоторого определенного значения, устанавливаемого для данного аппарата и его деталей.

2. В каждой электрической цепи может быть ненормальный (перегрузка) или аварийный (короткое замыкание) режим работы. Ток, протекающий по аппарату в этих режимах, существенно (в 50 и более раз) превышает номинальный, или рабочий, ток. Аппарат подвергается в течение определенного времени чрезмерно большим термическим и электродинамическим воздействиям тока, однако он должен выдерживать эти воздействия без каких-либо деформаций, препятствующих дальнейшей его работе.

3. Каждый электрический аппарат работает в цепи с определенным напряжением, где возможны также и перенапряжения. Однако

электрическая изоляция аппарата должна обеспечивать надежную работу аппарата при заданных значениях перенапряжений.

4. Контакты аппаратов должны быть способны включать и отключать все токи рабочих режимов, а многие аппараты – также и токи аварийных режимов, которые могут возникнуть в управляемых и защищаемых цепях.

5. К каждому электрическому аппарату предъявляются требования по надежности и точности работы, а также по быстродействию.

6. Любой электрический аппарат должен, по возможности, иметь наименьшие габариты, массу и стоимость, быть простым по устройству, удобным в обслуживании и технологичным в производстве.

Одной из наиболее сложных задач, решаемых при разработке электромеханического электронного аппарата, является обеспечение работоспособности электрических контактов, в том числе и при гашении электрической дуги, возникающей при выключении ЭА.

Совершенствование конструкции автомобиля с целью повышения безопасности его движения, экономичности, надежности, комфортабельности и других показателей, привело к значительному увеличению количества приборов электрооборудования автомобиля и повышению их мощности.

Так, например, если на автомобиле МАЗ-200 было 25 приборов, на МАЗ-500 около 50, то на автомобилях КамАЗ более 100.

С увеличением количества приборов усложняются схемы электрических соединений и увеличивается число коммутационной аппаратуры. К коммутационной и защитной аппаратуре систем электрооборудования автомобиля относятся выключатели, переключатели, реле, контакторы, электромагниты, предохранители, панели соединительные, разъемные соединения, розетки и вилки.

Надежная работа указанных электрических аппаратов в большой степени определяется физическими явлениями и процессами, основными из которых являются тепловые процессы, контактные явления и процессы, связанные с образованием дуги.

Вопросы для самопроверки к главе 9:

1. Что называется электрическим аппаратом?
2. Перечислите основные функции электрических аппаратов.

3. Какие электрические аппараты называются коммутационными?
4. Как классифицируются электрические аппараты по назначению?
5. Перечислите основные виды электрических аппаратов.
6. Какие требования предъявляются к электрическим аппаратам.

Глава 10. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

10.1. Тепловые процессы в электрических аппаратах

Электрические аппараты являются сложными электротехническими устройствами, содержащими много элементов, одни из которых являются проводниками электрических токов, другие - проводниками магнитных потоков. Работа большей части аппаратов связана с преобразованием одних видов энергии в другие. При этом, как известно, неизбежны потери энергии и превращение ее в тепло. Тепловая энергия частично расходуется на повышение температуры аппарата и частично отдается в окружающую среду.

При увеличении температуры происходит ускоренное старение изоляции проводников и уменьшение их механической прочности. Так, например, при возрастании длительной температуры всего лишь на 8 °С сверх допустимой для данного класса изоляции, срок службы последней сокращается в 2 раза.

При увеличении температуры меди со 100 до 250 °С механическая прочность снижается на 40 %. Следует иметь в виду, что при коротком замыкании, когда температура может достигать предельных значений (200-300 °С), токоведущие части подвержены воздействию больших электродинамических сил. Работа контактных соединений также сильно зависит от температуры.

Нагрев токоведущих частей и изоляции аппарата в значительной степени определяет его надежность. Поэтому, во всех возможных режимах работы температура частей аппарата не должна превосходить таких значений, при которых не обеспечивается его длительная работа.

10.1.1. Источники теплоты в электрических аппаратах

При протекании тока по электрическому проводнику в нём выделяется мощность P , которая для однородного проводника с равномерной плотностью постоянного тока I в единицу времени определяется как

$$P = I^2 R,$$

где R – активное электрическое сопротивление проводника длиной l и поперечным сечением S

$$R = \frac{\rho l}{S}.$$

Удельное электрическое сопротивление материала проводника ρ зависит от температуры T и в большинстве случаев (до температуры 150 – 200 °С) вычисляется

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при температуре 0 °С; α – температурный коэффициент сопротивления.

Как известно из курса теоретических основ электротехники (ТОЭ), поверхностным эффектом называется явление неравномерного распределения плотности переменного тока по поперечному сечению одиночного проводника, а эффектом близости – явление неравномерного распределения плотности переменного тока, обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с токами.

Неравномерность распределения плотности тока приводит к возникновению дополнительных потерь мощности. При этом следует учитывать, что в проводниках из ферромагнитных материалов вышеуказанные явления проявляются значительно сильнее, чем в немагнитных проводниках.

В ферромагнитных нетоковедущих частях электрического аппарата, находящихся в переменном магнитном поле, также имеют место источники теплоты. Это обусловлено вихревыми токами, возникающими тогда, когда переменный во времени магнитный поток пронизывает ферромагнитные части аппарата.

Если магнитопровод выполнен из листовой электротехнической стали (шихтованный магнитопровод), то потери мощности в нём существенно меньше, чем в сплошном стальном магнитопроводе.

В электромеханических аппаратах, предназначенных для коммутации электрических цепей, мощным источником теплоты является электрическая дуга. В электромагнитных муфтах, предназначенных для коммутации и передачи механической мощности, потери на трение составляют существенную долю от общих потерь мощности.

10.1.2. Анализ способов распространения теплоты в электрических аппаратах

Передача теплоты всегда идёт от более нагретых тел к менее нагретым и происходит до тех пор, пока температура тел не сравняется. Чем выше температура нагретого тела, тем интенсивнее будет происходить передача тепла. Различают три способа распространения теплоты в пространстве: теплопроводностью, тепловым излучением и конвекцией.

Теплопроводность – распространение тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц или тел, имеющих разную температуру. Теплопроводящие свойства среды характеризуются коэффициентом теплопроводности.

Тепловое излучение – распространение внутренней энергии тела путём излучения электромагнитных волн. Совокупность процессов взаимного излучения, поглощения, отражения и пропускания энергии в системе различных тел называется теплообменом излучением. Процесс осуществляется электромагнитными колебаниями с различной длиной волны. В наибольшей степени переносят тепловую энергию инфракрасные лучи (длина волны 0,8 – 40 мкм), в меньшей степени – световые лучи (длина волны 0,4 – 0,8 мкм).

Конвекция – распространение теплоты при перемещении объёмов жидкостей или газов в пространстве из областей с одной температурой в области с другой температурой.

Различают *естественную* и *вынужденную* (искусственную) конвекцию. При вынужденной конвекции жидкость или газ движутся за

счёт внешних сил (под действием насоса, вентилятора и т.п.). При естественной конвекции движение происходит за счёт выталкивающих (Архимедовых) сил, возникающих из-за различных плотностей холодных и горячих частиц жидкости или газа.

Коэффициент теплопередачи конвекцией определяет количество теплоты, которая отдаётся в секунду с 1 м² нагретой поверхности при разности температур поверхности и охлаждающей среды 1 °С. Он зависит от многих факторов, главные из которых – скорость движения и теплоёмкость охлаждающей среды, температура поверхности и среды, геометрические размеры и форма нагретой поверхности.

10.1.3. Режимы работы электрических аппаратов

При эксплуатации электрических аппаратов могут иметь место следующие режимы работы:

- *продолжительный* – при котором температура аппарата достигает установившегося значения и аппарат при этой температуре остаётся под нагрузкой сколь угодно длительное время;

- *прерывисто-продолжительный* – при котором аппарат остаётся под нагрузкой при установившемся значении температуры ограниченное техническими условиями (ТУ) время;

- *повторно-кратковременный* – при котором температура частей электрического аппарата за время нагрузки не достигает установившегося значения, а за время паузы не уменьшается до температуры окружающей среды;

- *кратковременный* – при котором в период нагрузки температура частей электрического аппарата не достигает установившегося значения, а в период отсутствия нагрузки достигает температуры холодного состояния;

- *короткого замыкания* – это частный случай кратковременного режима работы, когда температура частей электрического аппарата значительно превосходит установившуюся температуру при нормальном режиме работы. Обычно электрические аппараты могут работать в одном из следующих режимов, для которых характерно определённое изменение во времени t тока нагрузки I_n и превышение темпера-

туры нагрева τ (разность между температурой аппарата и температурой окружающей среды): продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном и перемежающемся.

В *продолжительном режиме* (рис. 10.1) достигается установившееся превышение температуры нагрева τ_m , значение которого в любом случае должно быть меньше, чем допустимое превышение температуры τ_0 . Скорость изменения температуры характеризуется *тепловой постоянной времени* ϑ_0 . Касательная к кривой $\tau = f(t)$ отсекает на линии установившейся температуры как раз отрезок, равный по длительности ϑ_0 .

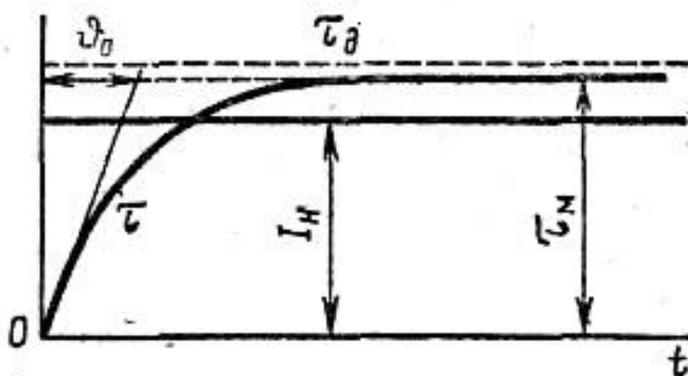


Рис. 10.1. Продолжительный режим работы

В *кратковременном режиме* (рис. 10.2 а) в период наличия тока I_0 температура аппарата не успевает достичь установившегося значения, а за время паузы тока t_{II} температура аппарата снижается практически до температуры окружающей среды $T_{окр}$. Это позволяет осуществлять форсирование аппарата по току с тем условием, что за время нагрузки $t_{нГ}$ не будет достигнуто τ_0 . В *повторно-кратковременном режиме* (рис. 10.2 б) температура аппарата так же не достигает установившегося значения в период $t_{нГ}$, а во время паузы тока не успевает снизиться до $T_{окр}$. Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$ПВ = \frac{t_{нГ}}{t_{нГ} + t_{II}} \times 100\%,$$

где $t_{нр}$ и $t_{п}$ – время нагрузки и время паузы. Стандартные значения $ПВ$ составляют 15, 25, 40 и 60%.

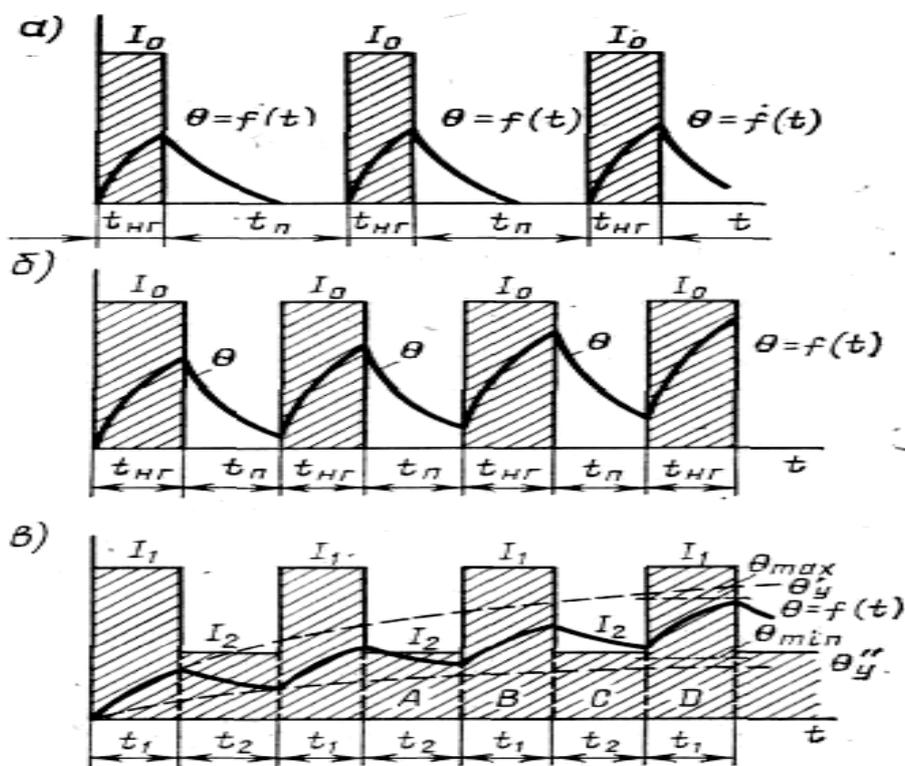


Рис. 10.2. Режимы работы аппаратов

Коэффициент перегрузки по мощности k_p показывает, во сколько раз можно увеличить мощность источников теплоты в электрическом аппарате при повторно-кратковременном режиме работы по сравнению с мощностью при продолжительном режиме при условии равенства допустимой температуры в том и другом случаях.

Если $t_{нр} + t_{п} \leq 0,1\theta_0$, то в этом случае, с погрешностью не более 5% можно определить

$$k_p = \frac{t_{нр} + t_{п}}{t_{нр}}.$$

Поскольку, при прочих равных условиях, мощность источников теплоты в большинстве случаев пропорциональна квадрату тока, то вводится коэффициент перегрузки по току k_I , который равен $k_I = \sqrt{k_p}$.

Наиболее общим является *перемежающийся режим* (рисунок 2.2, в) когда в период t_1 проходит ток I_1 , а в период t_2 – ток I_2 , причём $I_1 \neq I_2$. В установившемся состоянии температура перегрева имеет максимум θ_{\max} и минимум θ_{\min} . Если по аппарату длительное время проходит ток I_1 , то установившаяся температура перегрева равна θ'_y . Аналогично, току I_2 соответствует температура перегрева θ''_y . По прошествии некоторого времени θ_{\max} и θ_{\min} соседних циклов станут одинаковыми. Наступит так называемый *квазистационарный* («мнимостационарный») режим работы с неизменными значениями θ_{\max} и θ_{\min} .

10.2. Контактные явления в электрических аппаратах

Электрический контакт – соприкосновение тел, обеспечивающее протекание тока в электрической цепи. Соприкасающиеся тела называются также контактами или контакт-детальями.

10.2.1. Классификация электрических контактов

Виды контактных соединений, наиболее часто встречающиеся в электрических аппаратах, классифицируются по различным признакам. По виду соединения электрические контакты могут быть:

- взаимонеподвижные: разъёмные (болтовое соединение); неразъёмные (сварные, паяные, напылённые);

- взаимоподвижные: неразмыкающиеся – предназначенные для осуществления передачи электрической энергии с неподвижных частей установки на подвижные или наоборот: гибкие связи типа «косичка», щёточные скользящие, жидкометаллические, роликовые;

размыкающиеся – расходящиеся в процессе работы: мостиковые контакты, розеточные контакты, пальцевые или ножевые, с плоскими пружинами (рис. 10.3). Для выяснения сущности явления электрического контакта рассмотрим механический контакт двух металлических твердых тел. При любой, сколь угодно чистой обработке два металлических тела соприкасаются не по всей видимой поверхности, а лишь в отдельных точках по микровыступам. Обычно, для обеспечения надежного протекания электрического тока, контакты сжимают силой, которая называется силой контактного нажатия. Эта сила может создаваться при затяжке болтов, при обжатии контактного наконечника на конце провода или кабеля или из-за деформации пружин контактной системы.

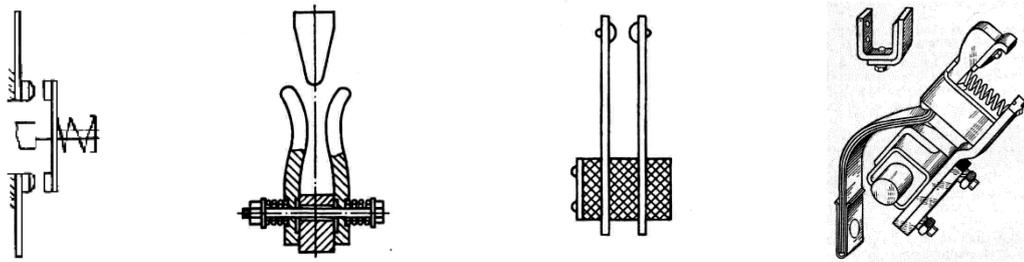


Рис. 10.3. Виды размыкающихся контактов

10.2.2. Контактная поверхность и контактное сопротивление

При этом микровыступы, по которым произошел начальный контакт, деформируются; в соприкосновение могут прийти другие выступы и они также могут деформироваться. На поверхности образуются площадки, которые и воспринимают усилие контактного нажатия (рис.10.4).

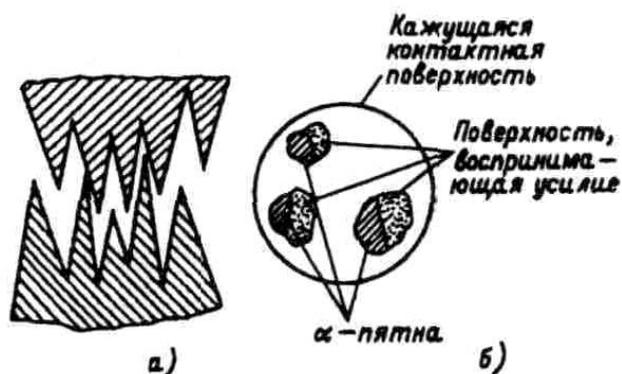


Рис. 10.4. Контакт твёрдых тел

Давление в разных точках поверхности контактных площадок в общем случае не одинаково и может вызывать как упругие, так и пластические деформации.

Таким образом, механический контакт двух тел происходит не по всей видимой поверхности, а лишь в отдельных точках, а при сжатии их силой - по отдельным площадкам.

Общая поверхность тел, с которой производится контакт, называется *кажущейся контактной поверхностью*. На этой поверхности

можно увидеть площадки, полученные в результате деформации микровыступов, которые воспринимают усилие. Эта часть контактной поверхности называется *поверхностью, воспринимающей усилие*.

Очевидно, что электрический ток может проходить только в точках контактной поверхности, в которых имеет место механический контакт, т. е. через точки поверхности, воспринимающие усилие. Однако условие механического контакта является необходимым, но недостаточным для протекания тока.

При ближайшем рассмотрении поверхности, воспринимающей усилие, можно видеть, что она весьма неоднородна, а именно: в общем случае одна часть ее покрыта *плёнками оксидов*, другая – *адгезионными слоями атомов кислорода* и, наконец, третья часть представляет собой чисто *металлическую поверхность*.

Для прохождения электрического тока поверхность, покрытая оксидными пленками, обладает большим электрическим сопротивлением, поскольку удельное сопротивление оксидов на несколько порядков выше удельного сопротивления чистых металлов.

Через поверхность, покрытую адгезионными слоями кислорода, электрический ток может протекать за счет туннельного эффекта, заключающегося в проникновении электронов через потенциальный барьер. Этот участок поверхности имеет квазиметаллический характер проводимости.

И, наконец, третья часть поверхности проводит свободно электрический ток благодаря чисто металлической проводимости.

Квазиметаллические и металлические поверхности контакта принято называть α -пятнами. Это именно те части контактной поверхности, через которые в электрических контактах протекает ток.

В электрических контактах ток проходит только через небольшую часть кажущейся контактной поверхности, и, следовательно, он должен испытывать сопротивление при прохождении через зону контакта.

Рассмотрим однородный линейный проводник постоянного поперечного сечения (рис. 10.5), по которому протекает постоянный ток I . Между точками a и b , находящимися на расстоянии l , измерим разность потенциалов U_1 . Тогда активное сопротивление участка проводника $R_1 = U_1/I$.

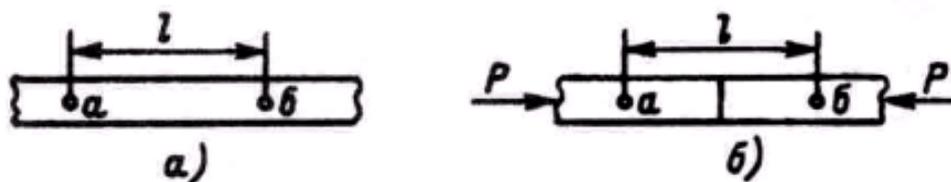


Рис. 10.5. К определению переходного сопротивления контактов:
 a - проводник; b - проводник с контактом

Разрежем проводник в средней части l и затем снова соединим его, сжав силой P . При протекании того же тока I получим разность потенциалов между точками a и b равную U_2 и отличную от разности потенциалов U_1 . В этом опыте сопротивление $R_2 = U_2/I$. Разность сопротивлений $R_{\text{пер}} = R_2 - R_1$ называется *переходным сопротивлением контакта*.

Следует отметить, что если на некотором удалении от a -пятна линии тока параллельны друг другу, то в непосредственной близости от него они искривляются и «стягиваются» к a -пятну. Область электрического контакта, где линии тока искривляются, стягиваясь к a -пятну, называется *областью стягивания*.

В областях стягивания поперечное сечение проводника используется не полностью для протекания электрического тока, что и приводит к появлению дополнительного сопротивления. Это сопротивление называется *сопротивлением стягивания*.

Переходное сопротивление контакта зависит от обработки поверхности. Шлифовка ведёт к тому, что на поверхности остаются более пологие выступы с большим сечением. Смятие таких выступов затруднено, поэтому сопротивление шлифованных контактов выше, чем контактов с более грубой обработкой.

Наличие окисных плёнок приводит к тому, что при небольшом напряжении замыкаемой цепи или недостаточной силе нажатия на контакты протекание электрического тока становится невозможным. В связи с этим контакты на малые токи или на малые усилия нажатия изготавливаются из благородных металлов, не поддающихся окислению (золото, платина и др.).

В сильноточных (сильноточковых) контактах окисная плёнка разрушается либо благодаря большим усилиям нажатия, либо путём самозачистки при включении за счёт проскальзывания одного контакта относительно другого.

10.2.3. Зависимость переходного сопротивления от свойств материала контактов

Переходное сопротивление чрезвычайно чувствительно к окислению поверхности ввиду того, что окислы многих металлов (в частности, меди) являются плохими проводниками. У медных открытых контактов вследствие их окисления с течением времени переходное сопротивление может возрасти в тысячи раз.

В процессе длительного пребывания под током на поверхности замкнутых контактов также возникают окисные, плохо проводящие ток плёнки. Они проникают к площадкам контактирования и, увеличивая тем самым переходное сопротивление, могут вывести контакты из строя. Повышение температуры ускоряет степень окисления поверхности контактов. Повышение силы контактного нажатия, наоборот, затрудняет проникновение окисных плёнок к площадкам контактирования, повышая тем самым срок службы контактов.

Окислы серебра имеют электрическую проводимость, близкую к проводимости чистого серебра. При повышенных температурах окислы серебра разрушаются. Поэтому переходное сопротивление контактов из серебра практически не изменяется с течением времени. Оно даже может понизиться вследствие медленной пластической деформации материала в площадках контактирования. Для медных контактов применяются специальные меры по уменьшению окисления их рабочих поверхностей.

В разборных соединениях производят антикоррозионные покрытия рабочих поверхностей – серебрят, лудят, покрывают кадмием, никелируют и цинкуют. Применяют покрытие рабочих поверхностей нейтральной смазкой после их технического обслуживания.

Коммутирующие контакты, длительно работающие под током не выключаясь, выполняются, как правило, из серебра или металлокерамики на основе серебра. Для медных контактов снижается значение тока нагрузки по сравнению с допустимым значением. Тем самым снижаются нагрев контактов и интенсивность их окисления.

Возникающая при отключении дуга сжигает окислы, и переходное сопротивление снижается. Во многих аппаратах кинематическая схема предусматривает при замыкании некоторое проскальзывание одного контакта по другому. Образовавшаяся окисная пленка при этом разрушается.

Материалы большей твердости имеют большее переходное сопротивление и требуют большего контактного нажатия. Чем выше электрическая проводимость и теплопроводность материала, тем ниже переходное сопротивление.

10.2.4. Влияние переходного сопротивления контактов на нагрев проводников

Наличие переходного сопротивления контактов неизбежно приводит к тому, что в зоне контакта выделяется тепло, т. е. всякий электрический контакт является дополнительным источником тепла. В контактном соединении можно выделить зону стягивания, т. е. ту часть проводников, прилегающих к поверхности контакта, в которой сосредоточено сопротивление стягивания. Разумеется, сопротивление, обусловленное наличием окисных пленок, также сосредоточено в этой зоне, непосредственно между поверхностями контакта.

Ввиду того, что наружная поверхность зоны стягивания невелика, в первом приближении можно пренебречь количеством теплоты, отдаваемой в окружающую среду непосредственно этой поверхностью, и считать, что теплота, генерируемая в этой зоне, распространяется в части проводника, прилегающей к этой зоне, а далее с поверхности проводников - в окружающую среду.

При прохождении тока нагревается само тело проводника, что приводит к увеличению падения напряжения на этом участке электрической цепи. Кроме этого, изменяется сопротивление стягивания и увеличивается падение напряжения на переходном сопротивлении контакта $U_k = IR_{пер}$.

Известно, что для каждого материала существуют определённые падения напряжения на контактах, при которых температура контактного пятна достигает значений, характеризующих фазовое состояние материала. Так, температуре рекристаллизации соответствует напряжение размягчения. Температуре плавления материала соответствует

напряжения плавления, а температуре кипения – напряжение кипения. Для некоторых металлов значения этих напряжений приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Название металла	$U_{\text{размягчения}}, (U_p), \text{ В}$	$U_{\text{плавления}}, (U_{\text{пл}}), \text{ В}$	$U_{\text{кипения}}, (U_{\text{кип}}), \text{ В}$
Медь (Cu)	0, 12	0, 43	0, 79
Серебро (Ag)	0, 09	0, 37	0, 68
Платина (Pt)	0, 25	0, 65	1, 50
Вольфрам (W)	0, 40	1, 10	2, 10
Золото (Au)	0, 08	0, 43	0, 90

Зависимость сопротивления контакта от падения напряжения на нём ($R - U$ характеристика) представлена на рис. 10.6.

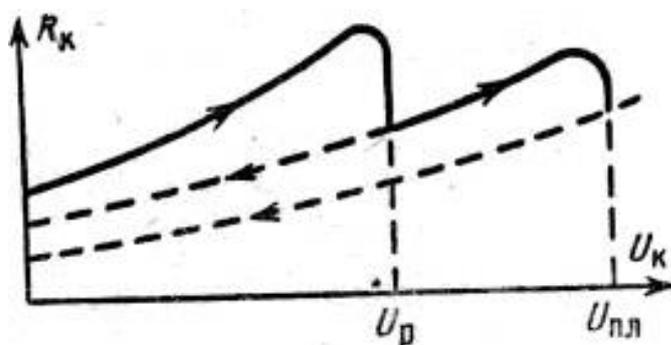


Рис. 10.6. U характеристика контакта

С ростом падения напряжения на контакте U_k переходное сопротивление вначале растёт, а затем, при напряжении U_p происходит резкое падение механических свойств материала. При том же усилии нажатия увеличивается площадь контактирования и переходное сопро-

тивление резко уменьшается. В дальнейшем оно снова линейно возрастает, а при напряжении $U_{пл}$ электрический контакт сваривается – переходное сопротивление снова резко уменьшается.

10.2.5. Сваривание электрических контактов

Использование контактов при условии, что напряжение U_k не превзойдет напряжения U_p возможно лишь в слаботочных (слаботочных) аппаратах. В сильноточных аппаратах, предназначенных для работы в режимах короткого замыкания, условие $U_k < U_p$ или $U_k < U_{пл}$ привело бы к необходимости создания чрезмерно больших усилий сжатия контактов. Поэтому в сильноточных аппаратах не исключено расплавление α -пятна в замкнутом состоянии контактов, что может привести к свариванию контактов так, как это происходит при точечной электросварке.

10.2.6. Износ контактов

Под износом контактов понимают разрушение рабочей поверхности коммутирующих контактов, приводящее к изменению их геометрической формы, размера, массы и т.д.

Износ, происходящий под действием электрических факторов, называется *электрическим износом – электрической эрозией* контактов. Износ под действием механических факторов здесь не рассматривается, он обычно много меньше электрического.

При размыкании сила, сжимающая контакты, снижается до нуля, резко возрастают переходное сопротивление контакта и плотность тока в последней площадке контактирования. Площадка сильно разогревается, и между расходящимися контактами образуется контактный перешеек (мостик) из расплавленного металла, который в дальнейшем рвется. При этом в промежутке между контактами могут возникнуть различные формы электрического разряда.

Мостиковую эрозию контактов можно объяснить термоэлектрическими эффектами, приводящими к асимметрии расплавленного металлического мостика (рис. 10.7), что, в конечном счете, приводит к переносу материала с одного контакта на другой.

В результате термоэлектрических эффектов максимум температуры приходится не на середину расплавленного мостика М а смещен от нее на Δx в сторону переноса теплоты. При разрыве он нарушается по изотерме с температурой T_{max} и на одном участке остается

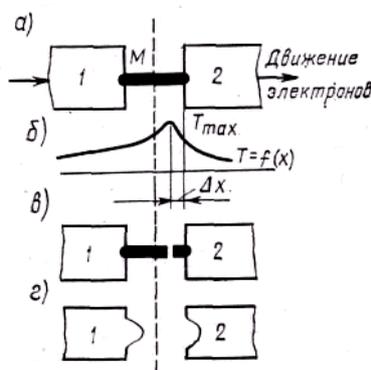


Рис. 10.7. Фазы мостиковой эрозии контактов

больше металла, чем на другом. Застывший металл при большом числе отключений образует неправильные формы контактов. Эффективные меры борьбы с эрозией состоят в создании симметричных тепловых режимов мостика, например, подбором соответствующих контактных пар.

Электрическая эрозия наблюдается при небольших токах; при больших токах характерен дуговой износ контактов. Он определяет *коммутационную износостойкость аппарата*, его способность выполнять определенное число коммутаций тока контактами в заданных условиях отключения цепи. Она выражается предельным для аппарата числом коммутационных циклов. *Механическая износостойкость аппарата* определяется его способностью выполнять определенное число операций отключения и отключения без тока в цепи главных контактов.

Дуговой износ контактов – это выгорание материала контактов под воздействием электрической дуги.

Энергия, сосредоточенная в небольших объемах, разогревает металл, плавит его и доводит до температуры кипения. Материал контактов выбрасывается в виде паров металла и капель.

Относительную дугостойкость различных металлов можно оценить на основании диаграммы (рис. 10.8). Она построена по результа-

там опытов с короткой дугой (0,8 мм) при токе 12 кА и продолжительности его протекания 0,0085 с. По оси ординат отложено отношение объёмного износа ΔV_3 к количеству электричества Δq , прошедшему через промежуток в форме газового разряда.

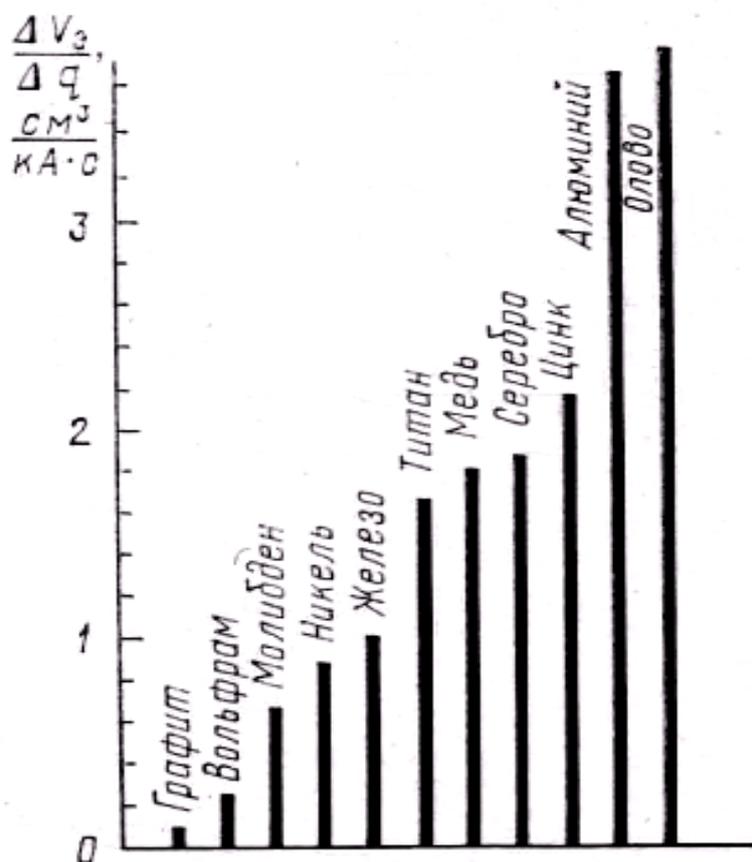


Рис. 10.8. Сопоставление удельного износа контактов

10.3. Основные материалы, применяемые в электрических аппаратах

10.3.1. Общие сведения о материалах

Материалы, применяемые электрических аппаратах, могут быть разбиты на следующие группы:

- проводниковые – медь, алюминий, латунь и др.;
- магнитные – различного рода электротехнические стали и сплавы для изготовления магнитопроводов;

- изоляционные – для электрической изоляции токоведущих частей друг от друга и от заземлённых элементов;
- дугостойкие изоляционные – асбест, керамика, пластмассы для дугогасительных камер;
- сплавы с высоким удельным сопротивлением – для изготовления различных резисторов;
- контактные – серебро, медь, металлокерамика для обеспечения высокой электрической износостойкости контактов;
- биметаллы – применяются в автоматических аппаратах, использующих линейное удлинение различных металлов при нагревании электрическим током;
- конструкционные – металлы, пластмассы и изоляционные материалы, служащие для придания аппаратам и их деталям тех или иных форм и для изготовления деталей, преимущественным назначением которых является передача и восприятие механических усилий.

10.3.2. Материалы для контактных соединений

К материалам контактов предъявляются следующие *требования*:

- высокая электрическая проводимость и большая теплопроводность;
- стойкость против коррозии в воздухе и других газах;
- стойкость против образования окисных плёнок с высоким удельным сопротивлением;
- малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия;
- высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях;
- малая электрическая эрозия;
- высокая дугостойкость (температура плавления);
- высокие значения тока и напряжения, необходимые для дугообразования;
- простота обработки, низкая стоимость.

Для контактных соединений применяются следующие материалы, свойства которых рассмотрены ниже.

Медь. Положительные свойства: высокие электрическая проводимость и теплопроводность, достаточная твердость, что позволяет применять при частых включениях и отключениях.

Недостатки: низкая температура плавления, на воздухе образуется плёнка прочных окислов, имеющих высокое сопротивление, требует больших сил нажатия. Для защиты меди от окисления поверхность контактов покрывается электролитическим способом слоем серебра толщиной 20—30 мкм. На главных контактах иногда ставятся серебряные пластинки (в аппаратах, включаемых относительно редко). Применяется как материал для плоских и круглых шин, контактов аппаратов высокого напряжения, контакторов, автоматов и др. Вследствие низкой дугостойкости нежелательно применение в аппаратах, отключающих мощную дугу и имеющих большое число включений в час.

Серебро. *Положительные свойства:* высокая электропроводность и теплопроводность, плёнка окислов серебра имеет малую механическую прочность и быстро разрушается при нагреве контактной точки. Устойчивость контакта и малое переходное сопротивление являются характерными свойствами серебра.

Отрицательные свойства: малая дугостойкость и недостаточная твердость серебра препятствуют использованию его при наличии мощной дуги и при частых включениях и отключениях. Применяется при токах до 20 А.

Алюминий. Этот материал имеет достаточно высокую электрическую проводимость и теплопроводность. Благодаря малой плотности токоведущая часть круглого сечения из алюминия на такой же ток, как и медный проводник, имеет почти на 48% меньшую массу. Это позволяет уменьшить массу аппарата.

Недостатки алюминия: образование на воздухе и в активных средах плёнок с высокой механической прочностью и высоким сопротивлением; низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра); малая механическая прочность; при контакте с медью образуется пара, подверженная сильной *электрохимической коррозии*. В связи с этим при механическом соединении с медью алюминий должен покрываться тонким слоем меди электролитическим путем либо оба металла необходимо покрывать серебром.

Алюминий и его сплавы (дюраль, силумин) применяются главным образом как материал для шин и конструктивных деталей аппаратов. Для коммутирующих контактов алюминий непригоден.

Вольфрам. Положительными свойствами вольфрама являются высокая дугостойкость, большая стойкость против эрозии и сваривания. Высокая твердость вольфрама позволяет применять его при частых включениях и отключениях.

Недостатками вольфрама являются: высокое удельное сопротивление, малая теплопроводность, образование прочных оксидных и сульфидных пленок. В связи с высокой механической прочностью и образованием пленок вольфрамовые контакты требуют большой силы нажатия.

Платина, золото, молибден. Применяются для коммутирующих контактов на очень малые токи при малых нажатиях. Платина и золото не образуют окисных плёнок. Контакты из этих металлов имеют малое переходное сопротивление. Для повышения износостойкости применяют сплавы из платины с иридием, молибденом или палладием.

Металлокерамические материалы. Рассмотрение свойств чистых металлов показывает, что ни один из них не удовлетворяет полностью всем требованиям, предъявляемым к разрывным контактам.

Материалы, обладающие желаемыми свойствами, получают методом порошковой металлургии. *Металлокерамика* – это механическая смесь двух практически не сплавляющихся металлов, получаемая методом спекания смеси их порошков при высокой температуре и давлении. Физические свойства металлов при изготовлении металлокерамических контактов сохраняются. Дугостойкость керамике сообщается такими металлами, как вольфрам, молибден. Для получения низкого переходного сопротивления контакта в качестве второго компонента используют серебро или медь. Наиболее распространёнными композициями металлокерамики являются: серебро – вольфрам; серебро – молибден; серебро – никель; серебро – окись кадмия; серебро – графит; серебро – окись меди и др.

Ниже в таблице приведены некоторые рекомендации по применению материалов для изготовления контактов реле.

Таблица 10.2

	Материал	Преимущества	Применение
Гальванические материалы			
1	Сплавы золота AuNi, AuAg, AuPd, AuCo	- позолота ≤ 1 мкм: для защиты контактов при длительном хранении - покрытие из твердого золота: очень хорошая коррозионная стойкость; низкое и стабильное контактное сопротивление при самых низких нагрузках; низкая склонность к холодной сварке	Рекомендуется переключение без тока/напряжения
Контактные материалы:			
2	Серебро-галладий Silver-Palladium	высокая устойчивость к переносу материала в сигнальных цепях постоянного тока, низкая склонность к сварке, более высокое контактное сопротивление, чем у Ag	цепи со средней нагрузкой, цепи постоянного и переменного тока, рекомендуемые для телекоммуникационные приложения.
3	Палладий-рутений Pd- Ru	высочайшая устойчивость к передаче материала в сигнальных цепях постоянного тока, низкая тенденция сварки, более высокое контактное сопротивление, чем у Ag	цепи со средней нагрузкой, цепи постоянного и переменного тока, рекомендуемые для телекоммуникационные приложения
4	Серебро-никель AgNi90 / 10	высокая устойчивость к электрическому износу, низкая склонность к сварке, выше контактное сопротивление, чем AgNi0,15	цепи со средней и высокой нагрузкой, цепи постоянного и переменного тока, рекомендуется диапазон применения ≥ 12 В, 10 мА.
5	Мелкозернистое серебро AgNi0.15	относительно низкое контактное сопротивление, низкая устойчивость к агрессивным атмосфера	универсально применяется в диапазоне средних и низких нагрузок, особенно в цепях постоянного тока
6	Серебро-олово-оксид AgSnO2	низкая склонность к сварке, высокая износостойкость при больших нагрузках, низкая передача материала	цепи с высокими требованиями к току отключения и отключения, постоянному току и нагрузки переменного тока
7	Серебро-кадмий-оксид AgCdO	низкая склонность к сварке, высокая износостойкость	для переключения индуктивных нагрузок, цепей переменного тока
8	Вольфрам W	самая высокая температура плавления, для высокой скорости переключения и низкого времени включения	как предварительный контакт в цепях с наибольшей рабочей нагрузкой.

Вопросы для самопроверки к главе 10:

1. Перечислите источники тепла, возникающие при работе электрических аппаратов.
2. Перечислите основные способы распространения теплоты в пространстве.
3. Раскройте понятие теплопроводности.
4. Перечислите режимы работы, которые имеют место при функционировании электрических аппаратов.
5. Что характеризует тепловая постоянная времени θ_0 .
6. Чем кратковременный режим работы отличается от повторно-кратковременного?
7. Что можно оценить по относительной продолжительности включения ПВ при работе электрического аппарата?
8. Что характеризует коэффициент перегрузки по мощности k_p ?
9. Дайте определение электрического контакта.
10. Что называется кажущейся контактной поверхностью?
11. Что называется переходным сопротивлением контакта?
12. Назовите способы определения переходного сопротивления контактов?
13. Как влияет окисная пленка на переходное сопротивление контактов различных металлов?
14. Перечислите основные материалы для изготовления контактов различного назначения.
15. Перечислите основные пути снижения переходного сопротивления контактов.

Глава 11. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

11.1. Коммутация электрической цепи

Под *коммутацией* электрической цепи понимают процесс замыкания или размыкания цепи с током.

Коммутация может происходить под воздействием внешних или внутренних для данного устройства источников напряжения или тока.

При анализе и расчёте процессов коммутации необходимо учитывать общий закон коммутации:

- при коммутации индуктивных электрических цепей не могут изменяться скачком ток цепи и магнитный поток ($di/dt \neq \infty, d\Phi/dt \neq \infty$);

- при коммутации емкостных цепей не могут изменяться скачком напряжение и электрический заряд ($dU/dt \neq \infty, dQ/dt \neq \infty$).

Под *глубиной коммутации* понимают отношение сопротивления $R_{отк}$ коммутирующего органа в отключенном состоянии к сопротивлению $R_{вкл}$ во включенном состоянии

$$h_k = \frac{R_{отк}}{R_{вкл}}.$$

Контактные электрические аппараты, у которых сопротивление межконтактного промежутка в отключенном состоянии измеряется мегомами, а сопротивление замкнутых контактов – микромами, обеспечивают глубину коммутации

$$h_k = 10^6 \div 10^{14}.$$

Для бесконтактных аппаратов, которые по глубине коммутации уступают контактными аппаратами, обычно $h_k = 10^4 \div 10^7$.

11.2. Отключение электрической цепи контактными аппаратами

Отключение цепи контактными аппаратом характеризуется возникновением плазмы, которая проходит разные стадии газового разряда в процессе преобразования межконтактного промежутка из проводника электрического тока в изолятор.

При токах выше 0,5-1 А возникает стадия дугового разряда (область 1) (рис. 11.1); при снижении тока возникает стадия тлеющего разряда у катода (область 2); следующая стадия (область 3) – таунсендовский разряд, и наконец, область 4 – стадия изоляции, в которой носители электричества – электроны и ионы – не образуются за счет ионизации, а могут поступать только из окружающей среды.

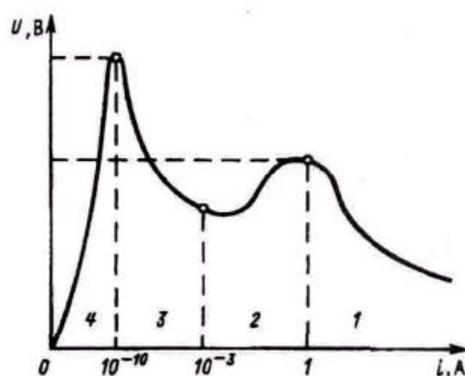


Рис. 11.1. Вольтамперная характеристика стадий электрического разряда в газах

Первый участок кривой – дуговой разряд (область 1) – характеризуется малым падением напряжения у электродов и большой плотностью тока. С ростом тока напряжение на дуговом промежутке сначала резко падает, а затем изменяется незначительно.

Второй участок (область 2) кривой, представляющий собой область тлеющего разряда, характеризуется высоким падением напряжения у катода (250 – 300 В) и малыми токами. С ростом тока возрастет падение напряжения на разрядном промежутке.

Таунсендовский разряд (область 3) характеризуется чрезвычайно малыми значениями тока при высоких напряжениях.

Электрическая дуга сопровождается высокой температурой и связана с этой температурой. Поэтому дуга – явление не только электрическое, но и тепловое.

В обычных условиях воздух является хорошим изолятором. Так, для пробоя воздушного промежутка в 1 см требуется приложить напряжение не менее 30 кВ. Для того чтобы воздушный промежуток стал проводником, необходимо создать в нем определенную концентрацию заряженных частиц: отрицательных – в основном свободных электронов, и положительных – ионов. Процесс отделения от нейтральной частицы одного или нескольких электронов с образованием свободных электронов и ионов называется *ионизацией*.

Ионизация газа может происходить под действием света, рентгеновских лучей, высокой температуры, под влиянием электрического поля и ряда других факторов. Для дуговых процессов в электрических аппаратах наибольшее значение имеют: из процессов, происходящих у

электродов, – термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии, а из процессов, происходящих в дуговом промежутке, – термическая ионизация и ионизация толчком.

11.3. Электрическая дуга

В коммутационных электрических аппаратах, предназначенных для замыкания и размыкания цепи с током, при отключении возникает разряд в газе либо в виде тлеющего разряда, либо в виде дуги. Тлеющий разряд возникает тогда, когда отключаемый ток ниже 0,1 А, а напряжение на контактах достигает величины 250 – 300 В. Такой разряд встречается либо на контактах маломощных реле, либо как переходная фаза к разряду в виде электрической дуги.

Основные свойства дугового разряда:

- дуговой разряд имеет место только при токах большой величины; минимальный ток дуги для металлов составляет примерно 0,5 А;
- температура центральной части дуги очень велика и в аппаратах может достигать 6000 – 18000 К;
- плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает $10^2 - 10^3$ А/мм²;
- падение напряжения у катода составляет всего 10 – 20 В и практически не зависит от тока.

В дуговом разряде можно различить три характерные области: околокатодную, область столба дуги (ствол дуги) и околоанодную (рис. 11.2.).

В каждой из этих областей процессы ионизации и деионизации протекают по-разному в зависимости от условий, которые там существуют. Поскольку результирующий ток, проходящий через эти три области, одинаков, в каждой из них происходят процессы, обеспечивающие возникновение необходимого количества зарядов.

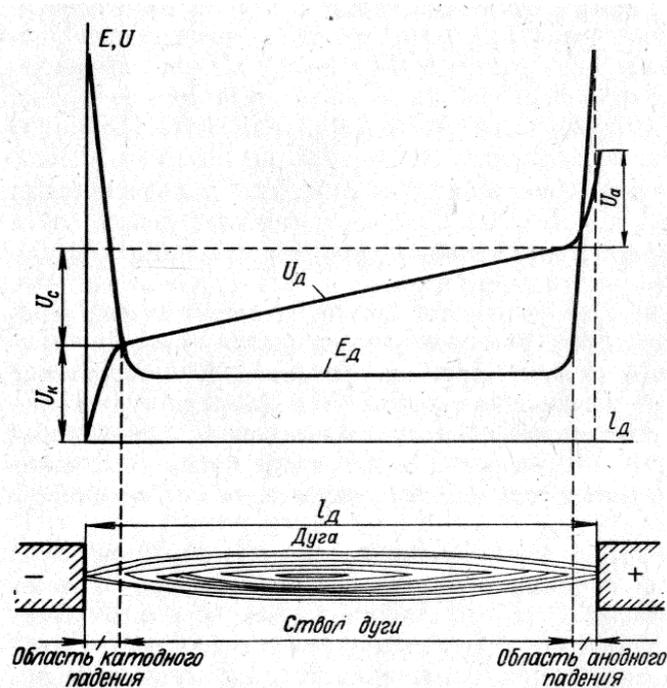


Рис. 11.2. Распределение напряжения и напряжённости электрического поля в стационарной дуге постоянного тока

Термоэлектронная эмиссия. Термоэлектронной эмиссией называется явление испускания электронов из накаливаемой поверхности.

При расхождении контактов резко возрастают переходное сопротивление контакта и плотность тока в последней площадке контактирования. Эта площадка нагревается до температуры плавления и образования контактного перешейка из расплавленного металла, который при дальнейшем расхождении контактов рвется. Здесь происходит испарение металла контактов. На отрицательном электроде образуется так называемое катодное пятно (раскаленная площадка), которое служит основанием дуги и очагом излучения электронов в первый момент расхождения контактов. Плотность тока термоэлектронной эмиссии зависит от температуры и материала электрода. Она невелика и может быть достаточной для возникновения электрической дуги, но она недостаточна для ее горения.

Автоэлектронная эмиссия. Это – явление испускания электронов из катода под воздействием сильного электрического поля.

Место разрыва электрической цепи может быть представлено как конденсатор переменной емкости. Емкость в начальный момент равна бесконечности, затем убывает по мере расхождения контактов. Через

сопротивление цепи этот конденсатор заряжается, и напряжение на нем растет постепенно от нуля до напряжения сети. Одновременно увеличивается расстояние между контактами. Напряженность поля между контактами во время нарастания напряжения проходит через значения, превышающие 100 МВ/см. Такие значения напряженности электрического поля достаточны для вырывания электронов из холодного катода.

Ток автоэлектронной эмиссии также весьма мал и может служить только началом развития дугового разряда.

Таким образом, возникновение дугового разряда на расходящихся контактах объясняется наличием термоэлектронной и автоэлектронной эмиссий. Преобладание того или иного фактора зависит от значения отключаемого тока, материала и чистоты поверхности контактов, скорости их расхождения и от ряда других факторов.

Ионизация толчком. Если свободный электрон будет обладать достаточной скоростью, то при столкновении с нейтральной частицей (атом, а иногда и молекула) он может выбить из неё электрон. В результате получатся новый свободный электрон и положительный ион. Вновь полученный электрон может, в свою очередь, ионизировать следующую частицу. Такая ионизация носит название ионизации толчком.

Для того чтобы электрон мог ионизировать частицу газа, он должен двигаться с некоторой определенной скоростью. Скорость электрона зависит от разности потенциалов на длине его свободного пробега. Поэтому обычно указывается не скорость движения электрона, а то минимальное значение разности потенциалов, какое необходимо иметь на длине свободного пути, чтобы электрон к концу пути приобрел необходимую скорость. Эта разность потенциалов носит название *потенциала ионизации*.

Потенциал ионизации для газов составляет 13 – 16 В (азот, кислород, водород) и до 24,5 В (гелий), для паров металла он примерно в два раза ниже (7,7 В для паров меди).

Термическая ионизация. Это – процесс ионизации под воздействием высокой температуры. Поддержание дуги после ее возникновения, т.е. обеспечение возникшего дугового разряда достаточным числом свободных зарядов, объясняется основным и практически единственным видом ионизации – термической ионизацией.

Температура столба дуги с средним равна 6000 – 10000 К, но может достигать и более высоких значений – до 18000 К. При такой температуре сильно возрастает как число быстро движущихся частиц газа, так и скорость их движения. При столкновении быстро движущихся атомов или молекул большая часть их разрушается, образуя заряженные частицы, т.е. происходит ионизация газа. Основной характеристикой термической ионизации является *степень ионизации*, представляющая собой отношение числа ионизированных атомов в дуговом промежутке к общему числу атомов в этом промежутке. Одновременно с процессами ионизации в дуге происходят обратные процессы, т. е. воссоединение заряженных частиц и образование нейтральных частиц. Эти процессы носят название *деионизации*.

Деионизация происходит главным образом за счет *рекомбинации* и *диффузии*.

Рекомбинация. Процесс, при котором различно заряженные частицы, приходя во взаимное соприкосновение, образуют нейтральные частицы, называется рекомбинацией.

В электрической дуге отрицательными частицами являются в основном электроны. Непосредственное соединение электронов с положительным ионом ввиду большой разности скоростей маловероятно. Обычно рекомбинация происходит при помощи нейтральной частицы, которую электрон заряжает. При соударении этой отрицательно заряженной частицы с положительным ионом образуется одна или две нейтральные частицы.

Диффузия. Диффузия заряженных частиц представляет собой процесс выноса заряженных частиц из дугового промежутка в окружающее пространство, что уменьшает проводимость дуги.

Диффузия обусловлена как электрическими, так и тепловыми факторами. Плотность зарядов в столбе дуги возрастает от периферии к центру. Ввиду этого создается электрическое поле, заставляющее ионы двигаться от центра к периферии и покидать область дуги. В этом же направлении действует и разность температур столба дуги и окружающего пространства. В стабилизированной и свободно горящей дуге диффузия играет ничтожно малую роль.

Падение напряжения на стационарной дуге распределяется неравномерно вдоль дуги. Картина изменения падения напряжения U_d и напряжённости электрического поля (продольного градиента напряжения) $E_d = dU/dx$ вдоль дуги приведена на рисунке (см. рис 2.2). Под

градиентом напряжения E_d понимается падение напряжения на единицу длины дуги. Как видно из рисунка, ход характеристик U_d и E_d в приэлектродных областях резко отличается от хода характеристик на остальной части дуги. У электродов, в прикатодной и прианодной областях, на промежутке длины порядка 10^{-4} см имеет место резкое падение напряжения, называемое *катодным* U_k и *анодным* U_a . Значение этого падения напряжения зависит от материала электродов и окружающего газа. Суммарное значение прианодного и прикатодного падений напряжений составляет 15 – 30 В, градиент напряжения достигает $10^5 - 10^6$ В/см.

В остальной части дуги, называемой столбом дуги, падение напряжения U_d практически прямо пропорционально длине дуги. Градиент здесь приблизительно постоянен вдоль ствола. Он зависит от многих факторов и может изменяться в широких пределах, достигая 100 – 200 В/см.

Околоэлектродное падение напряжения $U_{\text{Э}}$ не зависит от длины дуги, падение напряжения в столбе дуги пропорционально длине дуги. Таким образом, падение напряжения на дуговом промежутке

$$U_d = U_{\text{Э}} + E_d l_d,$$

где: E_d – напряжённость электрического поля в столбе дуги;

$$l_d - \text{длина дуги}; U_{\text{Э}} = U_k + U_a.$$

В заключение следует ещё раз отметить, что в стадии дугового разряда преобладает термическая ионизация – разбиение атомов на электроны и положительные ионы за счёт энергии теплового поля. При тлеющем – возникает ударная ионизация у катода за счет соударения с электронами, разгоняемыми электрическим полем, а при таунсендовском разряде ударная ионизация преобладает на всём промежутке газового разряда.

11.3.1. Статическая вольтамперная характеристика электрической дуги постоянного тока

Важнейшей характеристикой дуги является зависимость напряжения на ней от величины тока. Эта характеристика называется вольт-амперной. С ростом тока i увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация, возрастает число ионизированных частиц в разряде и падает электрическое сопротивление дуги r_d .

Напряжение на дуге равно $ir_{д}$. При увеличении тока сопротивление дуги уменьшается так резко, что напряжение на дуге падает, несмотря на то, что ток в цепи возрастает. Каждому значению тока в установившемся режиме соответствует свой динамический баланс числа заряженных частиц.

При переходе от одного значения тока к другому тепловое состояние дуги не изменяется мгновенно. Дуговой промежуток обладает *тепловой инерцией*. Если ток изменяется во времени медленно, то тепловая инерция разряда не сказывается. Каждому значению тока соответствует однозначное значение сопротивления дуги или напряжения на ней.

Зависимость напряжения на дуге от тока при медленном его изменении называется *статической вольтамперной характеристикой* дуги.

Статическая характеристика дуги зависит от расстояния между электродами (длины дуги), материала электродов и параметров среды, в которой горит дуга.

Статические вольтамперные характеристики дуги имеют вид кривых, изображенных на рис. 11.3.

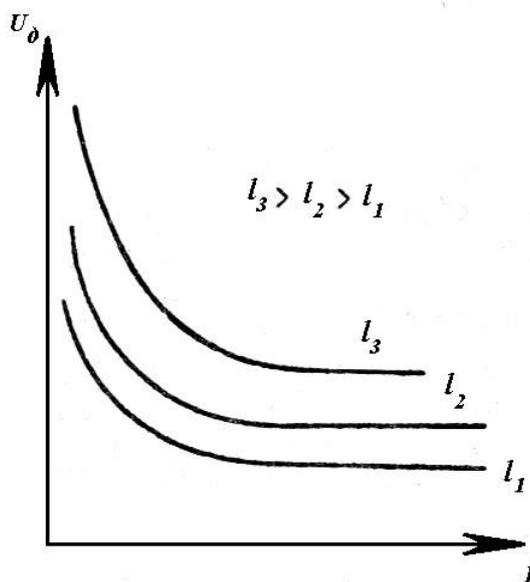


Рис. 11.3. Статические вольтамперные характеристики дуги

Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая вольтамперная характеристика. С ростом давления среды, в которой горит дуга, также увеличивается напряженность $E_{д}$ и поднимается вольтамперная характеристика, аналогично рис. 11.3.

Охлаждение дуги существенно влияет на эту характеристику. Чем интенсивнее охлаждение дуги, тем больше от нее отводится мощность. При этом должна возрасти мощность, выделяемая дугой. При заданном токе это возможно за счет увеличения напряжения на дуге. Таким образом, с ростом охлаждения вольтамперная характеристика располагается выше. Этим широко пользуются в дугогасительных устройствах аппаратов.

11.3.2. Динамическая вольтамперная характеристика электрической дуги постоянного тока

Если ток в цепи изменяется медленно, то току i_1 соответствует сопротивление дуги $r_{д1}$, а большему току i_2 соответствует меньшее сопротивление $r_{д2}$, что отражено на рис 11.4. (см. статическую характеристику дуги – кривая A).

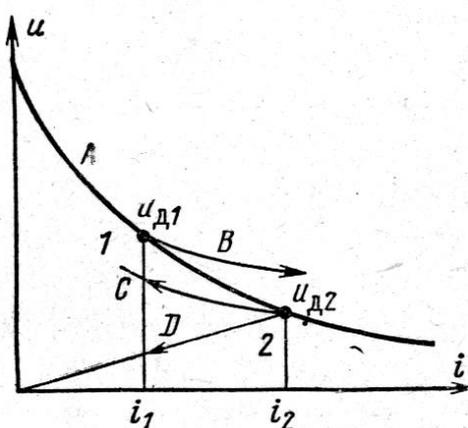


Рис.11.4. Динамическая вольтамперная характеристика дуги

В реальных установках ток может меняться довольно быстро. Вследствие тепловой инерции дугового столба изменение сопротивления дуги отстает от изменения тока.

Зависимость напряжения на дуге от тока при быстром его изменении называется *динамической вольтамперной характеристикой*.

При резком возрастании тока динамическая характеристика идет выше статической (кривая B), так как при быстром росте тока сопротивление дуги падает медленнее, чем растет ток. При уменьшении – ниже, поскольку в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении тока (кривая C).

Динамическая характеристика в значительной степени определяется скоростью изменения тока в дуге. Если в цепь ввести очень большое сопротивление за время, бесконечно малое по сравнению с тепловой постоянной времени дуги, то в течение времени спада тока до нуля сопротивление дуги останется постоянным. В этом случае динамическая характеристика изобразится прямой, проходящей из точки 2 в начало координат (прямая D), т. е. дуга ведет себя как металлический проводник, так как напряжение на дуге пропорционально току.

11.3.3. Условия гашения дуги постоянного тока

Чтобы погасить электрическую дугу постоянного тока, необходимо создать такие условия, чтобы в дуговом промежутке при всех значениях тока процессы деионизации протекали бы интенсивнее, чем процессы ионизации.

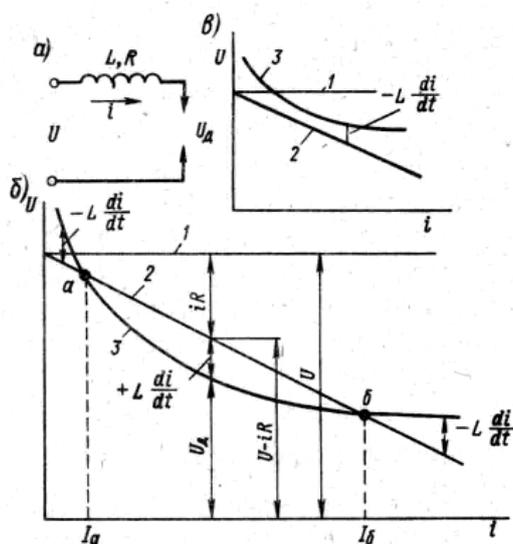


Рис. 11.5. Баланс напряжений в цепи с электрической дугой

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую сопротивление R , индуктивность L и дуговой промежуток с падением напряжения U_d , к которой приложено напряжение U (рис. 11.5 a). При дуге, имеющей неизменную длину, для любого момента времени будет справедливо уравнение баланса напряжений в этой цепи:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + U_d,$$

где $L \frac{di}{dt}$ – падение напряжения на индуктивности при изменении тока.

Стационарным режимом будет такой, при котором ток в цепи не меняется, т.е. $\frac{di}{dt} = 0$, а уравнение баланса напряжений примет вид:

$$U = iR + U_d.$$

Для погасания электрической дуги необходимо, чтобы ток в ней всё время уменьшался, т.е. $\frac{di}{dt} < 0$, а $U_d > U - iR$.

Графическое решение уравнения баланса напряжений представлено на рисунок 3.5, б. Здесь прямая 1 представляет собой напряжение источника U ; наклонная прямая 2 – падение напряжения на сопротивлении R (реостатная характеристика цепи), вычитаемое из напряжения U , т.е. $U - iR$; кривая 3 – вольтамперную характеристику дугового промежутка U_d .

Вопросы для самопроверки к главе 11:

1. Раскройте положения основного закона коммутации.
2. Что называется глубиной коммутации?
3. Опишите основные участки вольтамперной характеристики дугового разряда.
4. Перечислите основные свойства дугового разряда.
5. Назовите процессы, происходящие при горении электрической дуги.
6. Как влияет термоэлектронная эмиссия на процесс зарождения электрической дуги?
7. Назовите условия возникновения дуги при коммутации электрических цепей.
8. Что называется статической вольтамперной характеристикой дуги?
9. Что показывает динамическая вольтамперной характеристикой дуги?
10. Назовите условия гашения дуги постоянного тока.

Глава 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АВТОМОБИЛЯХ

Электрооборудование автомобилей представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных электрических и электронных устройств, приборов и систем, обеспечивающих надёжное функционирование двигателя, трансмиссии и ходовой части, безопасность движения, автоматизацию рабочих процессов автомобиля и комфортные условия для водителя и пассажиров.

В общем случае электрооборудование автомобилей можно разделить на три группы устройств:

- устройства, обеспечивающие генерацию и хранение электроэнергии на борту транспортных средств;
- потребители электроэнергии различного назначения, выполняющие вышеуказанные функции;
- приборы, обеспечивающие взаимосвязь и защиту от возможных аварийных режимов устройств первых двух групп.

К третьей группе устройств относится защитная и коммутационная аппаратура, от работоспособности которой зависит качество функционирования систем автомобиля.

Коммутационная аппаратура обеспечивает связь потребителей электрической энергии с бортовой сетью автомобиля. По принципу действия ее можно разделить на коммутационную аппаратуру прямого действия (выключатели, переключатели, кнопки) и аппаратуру дистанционного действия (реле, контакторы, разъединители).

Аппаратура прямого действия, которая часто требуется водителю во время движения, объединяется в комбинированные многофункциональные устройства.

Аппаратура дистанционного действия позволяет управлять потребителями на расстоянии, делает возможность управления слаботочными сигналами большими нагрузками, позволяет осуществлять управление потребителями в автоматическом режиме по заранее запрограммированному алгоритму.

К специфическим требованиям предъявляемые к коммутационной аппаратуре автомобилей, кроме описанных в п.1, следует отнести

- стойкость к повышенным вибрационным и ударным нагрузкам;

- надежная работа в широком диапазоне изменения температуры окружающего воздуха; - стойкость в условиях повышенной влажности; - малые размеры. Приведем основные виды коммутационных аппаратов, используемых в электрической сети автомобилей.

12.1. Выключатели

Выключатели и переключатели – самые многочисленный вид электрических аппаратов, без которых трудно себе представить современный автомобиль.

Выключатель – коммутационный электрический аппарат, имеющий как правило два коммутационных положения или состояния и предназначенный для включения и отключения тока. Они предназначены для включения и выключения потребителей электроэнергии.

Переключатели применяются для включения различных потребителей с возможностью регулировки их режимов работы (например, освещение и его регулировка, включение электродвигателя с различной частотой вращения его вала, включение сигнальных габаритных огней, включение стеклоочистителей и изменение скорости их движения др.).

Классификация выключателей:

- *по количеству позиций*, в которых может находиться контакты выключателя: однопозиционный, двухпозиционный, трехпозиционный, многопозиционный;

- *по количеству полюсов*: однополюсный, двух-полюсный, трехполюсный и т.д.;

- *по степени фиксации в рабочем или нерабочем состоянии*: фиксированные и нефиксированные;

- *по состоянию контактов в исходном состоянии*: нормально-замкнутые (в котором в выключенном состоянии контакты замкнуты) и нормально-разомкнутые (в котором в выключенном состоянии контакты разомкнуты).

- *по конструктивному исполнению*: кнопочные, клавишные, поворотные, поворотные со съемным ключом, перекидные, ползунковые, рычажные, нажимные, вытяжные, комбинированные, вакуумные, пневматические и гидравлические.

Клавишные выключатели и переключатели наиболее широко распространены на отечественных автомобилях. Преимущество таких конструкций - отсутствие рукояток и выступающих частей, которые могли бы вызвать травму при авариях. Некоторым их недостатком является затрудненное опознание нужного положения на ощупь. Для обозначения цепи или потребителя, включаемого клавишей, на них наносят условные символы. Клавишные выключатели применяются для коммутации электрических цепей наружного и внутреннего освещения, переключения режимов работы отопителя, управления системой обогрева заднего стекла, а также элементами дополнительного оборудования (электростеклоподъемниками и др.).

В перекидной конструкции (рис.12.1) при нажатии клавиши пружинный толкатель 5 перекидывает контактную пластину 6, замыкающую контакты 7. В ползунковой конструкции (рис.12.2) толкатель перемещает контактную пластину. При этом происходит самоочищение контактов. Падение напряжения на контактах выключателей и переключателей не должно превышать 0,1 В.

Для улучшения видимости выключателей в темноте некоторые из них оснащены миниатюрной бесцокольной лампой подсветки мощностью 1,2 Вт.

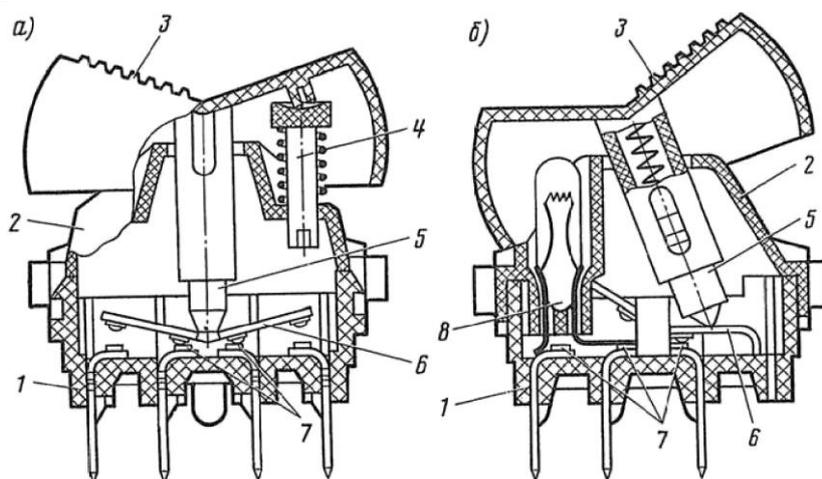


Рис. 12.1. Клавишные выключатели:

а- с самовозвратом, б- с принудительным возвратом;

1 - основание, 2 - корпус, 3 - клавиша, 4 - пружиненный шток,

5 - толкатель, 6 - подвижный контакт, 7 - неподвижные контакты,

8 - лампа подсветки

Перекидной переключатель, в котором использованы размыкающие контакты, изображен на рис.12.3. Такие переключатели предназначены для управления потребителями электроэнергии. Переключатель имеет корпус 4, в котором закреплены центральный контакт б с выводной клеммой и два боковых пружинных контакта 8, соединенных также с выводными клеммами. На корпусе укреплена металлическая крышка 3 с гайкой 1 и рычагом 10, закрепленным на оси.

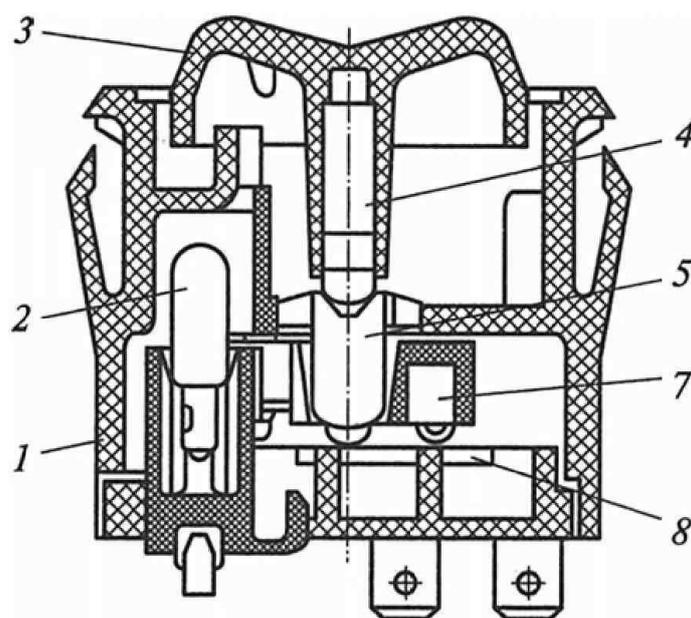


Рис. 12.2. Ползунковый выключатель:

1 - корпус, 2 - лампа подсветки, 3 - клавиша, 4 - пружина, 5 - толкатель, 6 - перекидная контактная пластина, 7 - подвижные контакты, 8 - неподвижные контакты

На конец рычага посажена латунная втулка 7, являющаяся подвижным контактом. Во втулке размещены пружина 9 и фиксирующий шарик 5.

Переключатель может находиться в трех положениях: среднее положение - «Выключено», два крайних положения - «Включено».

Поворотные конструкции применяются в выключателях зажигания, переключателях режимов работы отопителя, подрулевых переключателях.

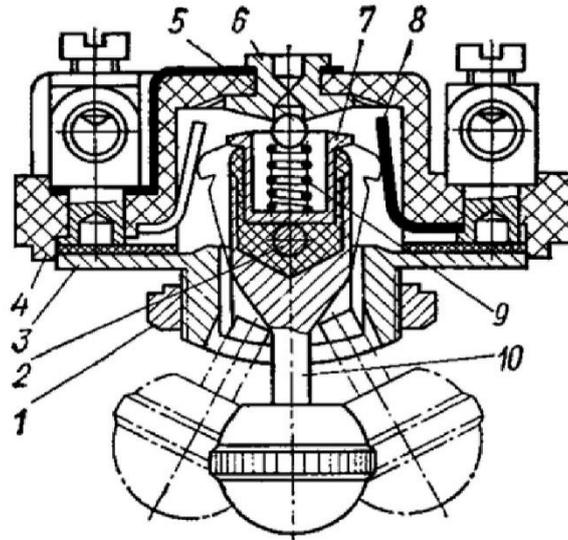


Рис. 12.3. Перекидной переключатель П20:

- 1 - гайка, 2 - ось рычага, 3 - крышка, 4 - корпус, 5 – фиксирующий шарик,
 6 - центральный контакт, 7 - латунная втулка, 8 - боковой контакт,
 9 - пружина, 10 - перекидной рычаг

12.1.1. Выключатель зажигания

Выключатель зажигания, встроенный в замок зажигания, с помощью контактной группы коммутирует основные электрические цепи систем электроснабжения автомобиля, таких как зажигания, пуска, систем управления двигателем и трансмиссией, освещения и др. Некоторые выключатели зажигания оборудованы противоугонным устройством путем механической блокировки вращения рулевого колеса, блокировкой от повторного включения стартера (повторное включение стартера возможно лишь после возврата ключа зажигания в положение «О» - выключено) и сигнализацией об оставленном в замке ключе зажигания.

Контактный узел выключателя состоит из подвижных и неподвижных контактных дисков 2 (рис. 12.4). Их взаимное перемещение включает или разрывает электрическую цепь.

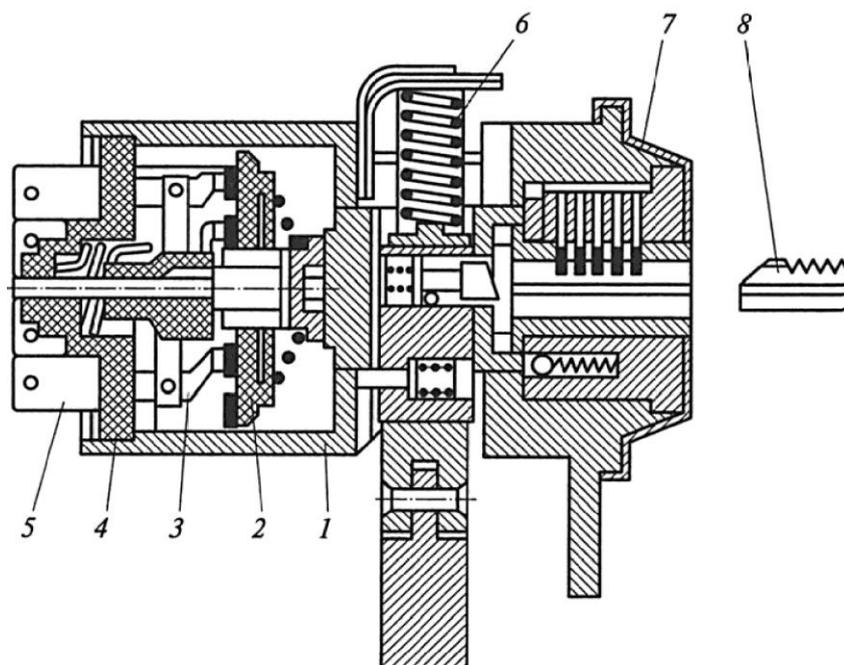


Рис. 12.4. Выключатель зажигания:

1 - корпус, 2 - поворотная панель с контактными дисками, 3 - неподвижные контакты, 4 — выводная панель, 5 - штекерные выводы, 6 - противоугонное устройство, 7 — замочное устройство, 8 -ключ

В положении «Аксессуары» выключатель зажигания подает питание на некоторые второстепенные устройства:

- вентилятор системы отопления салона;
- вентилятор охлаждения двигателя;
- приборы головного освещения;
- устройство коррекции света фар;
- автомагнитолу;
- электрические часы.

В положении «Зажигание включено» питание подается на основные блоки, перечисленные ниже, в дополнение к элементам, включенным в положении «аксессуары»:

- системы зажигания, топливоподдачи, системы управления, свечи накаливания в транспортных средствах с дизельным двигателем;
- указатели поворотов;
- стеклоочиститель и стеклоомыватель ветрового и заднего стекол;
- контрольно-измерительные приборы и сигнальные лампы;
- звуковой сигнал;

- противотуманные фары.

Дальнейший поворот ключа зажигания приводит к подключению реле стартера, которое, в свою очередь, обеспечивает подачу питания на стартерный электродвигатель. Это положение не фиксируемое, то есть ключ зажигания остаётся в этом положении до тех пор, пока удерживается вручную, и выключается, как только водитель его отпускает. Ключ возвращается в исходное положение «Зажигание включено» под действием пружины.

Положение «Стартер» сконструировано таким образом, что при включении стартера питание всех вспомогательных устройств, подключенных к клемме «Аксессуары», отключается для отвода максимальной мощности от батареи к стартерному двигателю.

Положение выключателя зажигания «Ключ внутри» используется для включения некоторых устройств, таких как автомагнитола, даже если выключатель находится в положение «Выключено», до тех пор, пока ключ остается вставленным. Если дверь автомобиля открыта без извлечения ключа зажигания, контакт выключателя зажигания «Ключ внутри» используется для инициирования сигнала зуммера, чтобы предупредить водителя об этом.

Контактная группа замка зажигания – компонент бортовой электрической системы транспортного средства, встроенное в замок зажигания и управляемое его ключом устройство коммутации, обеспечивающее включение и отключение бортовых потребителей тока, а также запуск и остановку силового агрегата транспортного средства.

Контактная группа (рис. 12.5) является основным элементом коммутации в любом транспортном средстве, так как с его помощью обеспечивается сама возможность его нормальной эксплуатации. На контактную группу возложено несколько функций:

- включение и отключение бортовых потребителей тока;
- запуск и остановка двигателя;
- выполнение охранных (противоугонных) функций.

Все эти функции обеспечиваются замыканием и разрывом электрических цепей переводом ключа зажигания в различные положения. При неисправности контактной группы нормальное управление автомобилем затрудняется или становится невозможным, поэтому данное устройство необходимо отремонтировать или заменить.

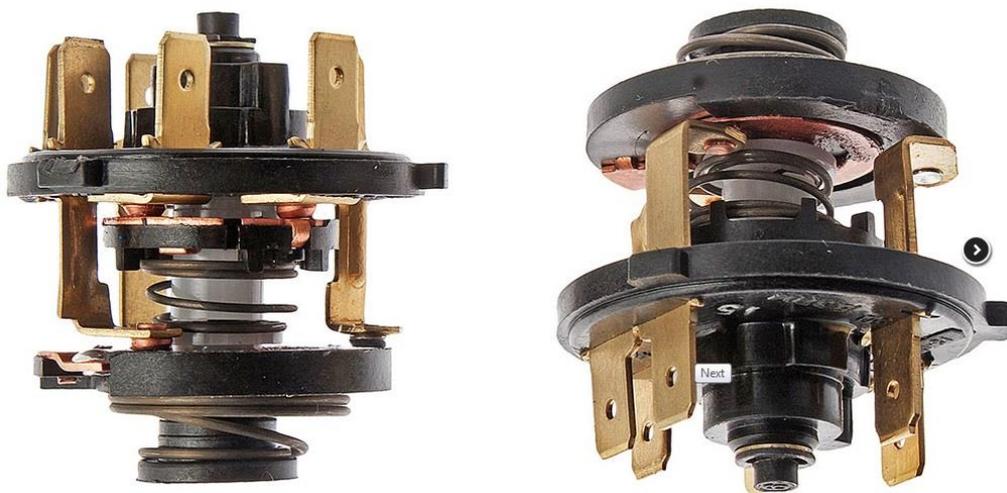


Рис. 12.5. Контактная группа замка зажигания

В настоящее время существует большое разнообразие контактных групп замков зажигания, однако все они имеют принципиально одинаковую конструкцию и принцип работы.

Любая контактная группа состоит из двух основных частей:

- поворотная часть, связанная с механизмом секретности (личинкой) выключателя зажигания;

- неподвижная контактная колодка, жестко смонтированная в нижней части корпуса замка.

Поворотная часть расположена непосредственно над контактной колодкой, внутри размещается механизм секретности замка зажигания, вся эта конструкция устанавливается в корпус замка, который монтируется на рулевую колонку или в приборную панель.

На неподвижной колодке из диэлектрического материала установлен ряд контактов, которые посредством клемм соединяются с соответствующими электрическими цепями автомобильной электросистемы. Контакты расположены в определенном порядке, который диктуется конструкцией подвижной части группы и последовательностью соединения электрических цепей при переводе ключа в различные положения. Как правило, контакты на колодке расположены в два ряда для экономии места, для предотвращения случайного замыкания контактов из внутреннего и внешнего рядов они могут располагаться на различных уровнях (то есть, быть разной высоты).



Рис. 12.6. Внешний вид контактов замка зажигания

Поворотная часть обычно выполняется в виде кольца из диэлектрического материала, на котором располагаются ответные контакты в виде токопроводящих металлических (медных) дорожек или соединенных друг с другом отдельных контактных поверхностей (изготовленных из полос металла, в виде бронзовых полусферических контактов и т.д.). Контакты поворотной части обращены к контактам колодки, образуя контактную группу выключателя зажигания и стартера.

Дополнительно в контактной группе предусматривается возвратная пружина, обеспечивающая возврат поворотной части в предыдущее положение после успешного запуска двигателя (для предотвращения работы стартера при работающем моторе). Также в этой конструкции или непосредственно в личинке замка может выполняться устройство фиксации в выбранных положения (кроме положения «Стартер»). В некоторых замках зажигания внутри контактной группы могут располагаться пластиковые световоды для декоративной подсветки (как, например, выполнено в автомобилях ВАЗ десятого семейства) и другие второстепенные компоненты.

Контактные группы отличаются типом клемм для соединения с электросистемой автомобиля, количеством положений и некоторыми особенностями функционала.

Распространенные типы клемм и разъемов:

- ножевые, для индивидуальных разъемов или общей колодки, выполненные непосредственно на корпусе группы;
- штыревые клеммы с аналогичным расположением;
- резьбовые клеммы (обычные винты большого сечения);

- электрический разъем, выведенный на стенку корпуса замка зажигания;
- вынесенный из корпуса электрический разъем, соединенный с контактной группой жгутом проводов.

Контактные группы могут иметь три, четыре или пять позиций в зависимости от функционала замка зажигания. В простейшем случае позиций всего три: «Выключено» (0 — электросистема автомобиля обесточена), «Зажигание» (I — ток подается на все приборы электро-системы, в том числе и на систему зажигания) и «Стартер» (II — ток от аккумуляторной батареи подается на электростартер через соответствующее реле).

Пример коммутации цепи зажигания через замок зажигания приведен на рис. 12.7.

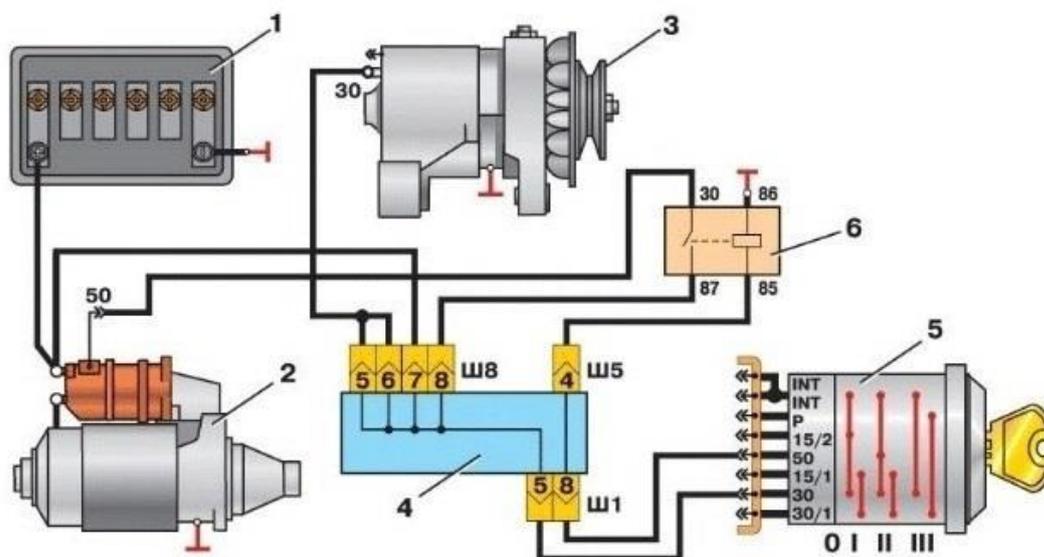


Рис. 12.7 - Коммутация цепи зажигания ВАЗ- 2101

- 1 – аккумуляторная батарея; 2 – электрический стартер; 3 – генератор;
 4 – блок предохранителей; 5 – замок зажигания; 6 – пусковое реле

12.1.2. Выключатель аварийной сигнализации

Выключатель аварийной сигнализации - орган управления системой световой сигнализации автомобилей и иных транспортных средств; выключатель специальной конструкции (устройство коммутации), обеспечивающее ручное включение и выключение световой аварийной сигнализации, а также визуальный контроль функционирования данной системы.

В соответствии с действующими российскими и международными стандартами, каждое колесное транспортное средство должно оснащаться световой аварийной сигнализацией («аварийкой»). Данная система служит для оповещения других участников дорожного движения о различных потенциально опасных или аварийных ситуациях — ДТП, остановках в запрещенном месте, необходимости оказания медицинской помощи водителю или пассажиру, во время буксировки другого автомобиля, в случае ослепления водителя в темное время суток (фарами встречного транспорта), а также при выполнении посадки/высадки детей из автобусов и иных специальных транспортных средств, и т.д.

Существующие сегодня выключатели имеют принципиально одинаковую конструкцию, отличаясь лишь внешним исполнением и некоторыми деталями. В основе устройства лежит контактная группа из подвижных и неподвижных контактов, часть которых является нормально замкнутыми (в выключенном положении замыкают цепь), а часть — нормально разомкнутыми (в выключенном положении размыкают цепь) (рис. 12.8). Количество контактов может достигать 6-8 и более, с их помощью осуществляется коммутация сразу большого числа цепей — всех указателей поворота с соответствующими реле, а также встроенной в выключатель сигнальной лампы/светодиода.

Контактная группа помещена в пластиковый (реже — в металлический) корпус, на лицевой поверхности которого располагается кнопка/клавиша управления, а на задней части — клеммы для подключения к электрической системе транспортного средства. Наиболее часто применяются стандартные ножевые клеммы, совместимые с соответствующими клеммными колодками или индивидуальными клеммами. В отечественных автомобилях широкое распространение получили выключатели со стандартизированным расположением клемм по

кругу, под такие устройства выпускаются соответствующие клеммные колодки.

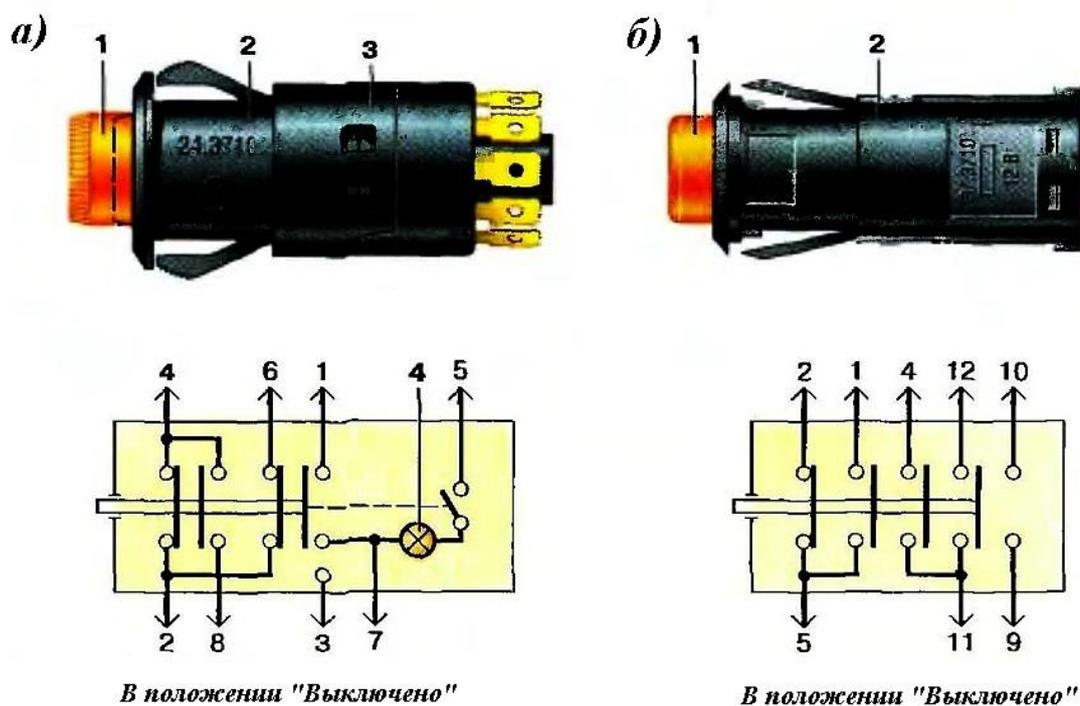


Рис. 12.8. Внешний вид и схема коммутации выключателей аварийной сигнализации:
а – 24.3710; б – 37.37104

1 –кнопка; 2 – корпус; 3 – кожух; 4 – встроенная сигнальная лампа

На корпусе выключателя располагаются монтажные элементы, посредством которых устройство фиксируется в предназначенном для него месте — в приборной панели или в рулевой колонке. В автомобилях ранних годов выпуска, а также во многих современных отечественных грузовиках монтаж выключателей осуществляется винтами или гайками (одна гайка наворачивается на предусмотренную на корпусе резьбу). В новых транспортных средствах выключатели чаще устанавливаются без применения какого-либо резьбового крепежа — для этого на корпусе устройства выполняются пластиковые защелки, пружины и упоры.

По способу управления выключатели аварийной сигнализации бывают двух типов:

- с фиксируемой кнопкой;

- с клавишным переключателем.

Устройства первого типа оснащаются кнопкой с механизмом фиксации, включение и выключение сигнализации осуществляется нажатием на кнопку — она переводится в то или иное положение, удерживаясь в нем и обеспечивая коммутацию цепей указателей поворота (рис. 12.9). Благодаря механизму фиксации держать кнопку пальцем нет необходимости. Обычно кнопка выполняется круглой и имеет большие размеры, хотя в современных автомобилях можно встретить кнопки различных форм (квадратные, овальные, треугольники, сложной формы), которые вписываются в общий дизайн салона и приборной панели.



Рис. 12.9. Типы выключателей аварийной сигнализации:
а - с фиксируемой кнопкой; б - клавишный

Устройства второго типа оснащаются клавишным переключателем с двумя фиксированными положениями, включение и отключение аварийной сигнализации осуществляется нажатием на соответствующую сторону клавиши. Как и кнопки, клавиши могут иметь более или менее стандартизированный дизайн, или выполняться для применения в конкретном модельном ряду автомобилей.

Все выключатели «аварийки» стандартно обозначаются пиктограммой в виде треугольника, очерченного белой полосой на красном фоне.

Под кнопкой/клавишей выключателя (или непосредственно в ней) располагается индикаторная лампа/светодиод, которая работает в прерывистом режиме синхронно с указателями поворота — так обеспечивается контроль работы аварийной сигнализации. Лампа/светодиод располагается либо непосредственно под прозрачной кнопкой, либо под прозрачным окошком в кнопке/клавише.

Выключатели выпускаются на напряжение питания 12 и 24 вольта и обычно имеют рабочий ток не более 5 ампер. Их подключение к электросети ТС выполняется таким образом, чтобы при включении сигнализации сразу все указатели поворота и сигнальная лампа подключались к реле указателей поворота и аварийной сигнализации, а при выключении сигнализации эти цепи были разомкнуты (и замыкались только соответствующими выключателями поворотников). При этом выключатель обеспечивает такую коммутацию цепей, при которой аварийная сигнализация работает даже при неисправности одного или нескольких указателей поворота. Схема включения рассматриваемых выключателей представлена на рис. 12.10. Следует учесть, что ввиду того, что при неисправности выключателя аварийной сигнализации или его отсутствии, цепь ламп указателей поворота становится разорванной и «поворотники» перестают работать. Здесь обозначено: 1 – блок-фары с передними указателями поворота; 3 – боковые указатели поворота 3 – монтажный блок; 4- реле зажигания; 5 – выключатель зажигания; 6 – реле-прерыватель указателей поворота и аварийной сигнализации; 7 – контрольная лампа указателей поворота; 8 задние фонари с лампами указателей поворота; 9 – выключатель аварийной сигнализации; 10 – переключатель указателей поворота. Б – цоколевка колодки выключателя аварийной сигнализации; В – цоколевка колодки задней фары.

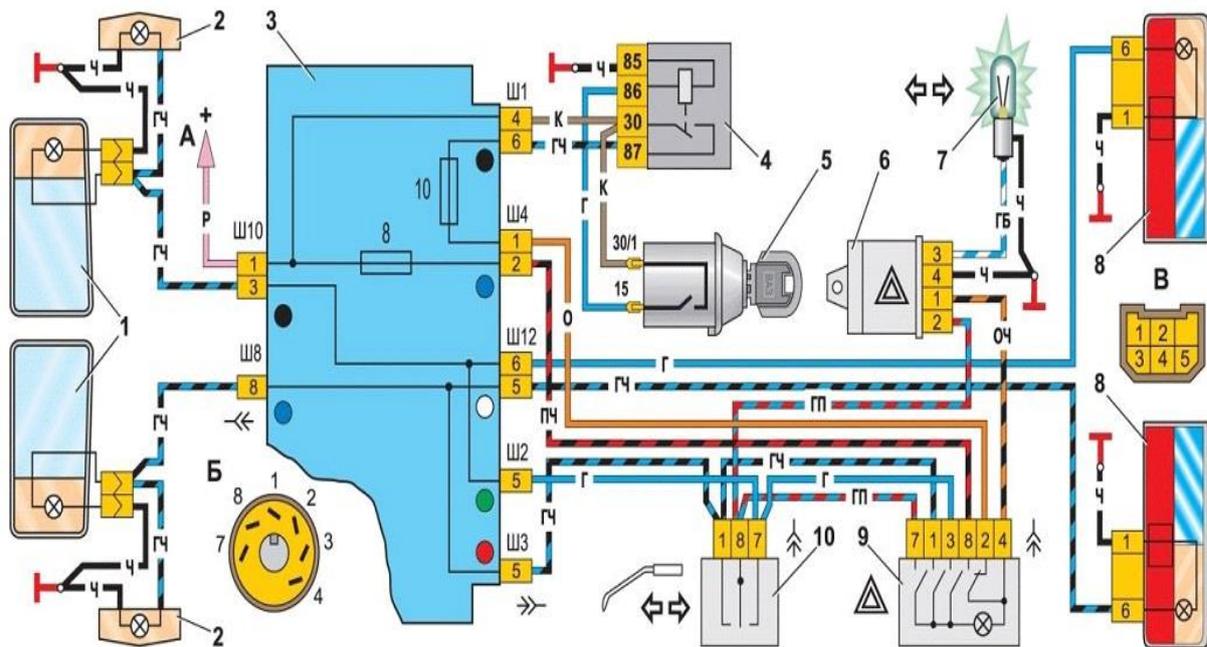


Рис. 12.10. Схема включения аварийной сигнализации автомобиля ВАЗ-2107:

12.1.3. Выключатель аккумуляторной батареи

Для коммутации силовых цепей на автомобилях и автобусах применяются контакторы, отличающиеся наличием массивной контактной системы, рассчитанной на коммутацию значительных токов (до 200А). Выключатель аккумуляторной батареи в автомобиле выступает в роли *контактора* - двухпозиционного аппарата с самовозвратом, предназначенный для частых коммутаций токов, не превышающих токи перегрузки, и приводимый в действие двигателем приводом. Выключатель аккумуляторной батареи (выключатель «массы») служит для отключения всех потребителей от батареи при длительной стоянке автомобиля, а также в случае аварийных режимов. Кнопка управления выключателем массы расположена так, что водитель может быстро ею воспользоваться для отключения батареи от сети, находясь на рабочем месте.

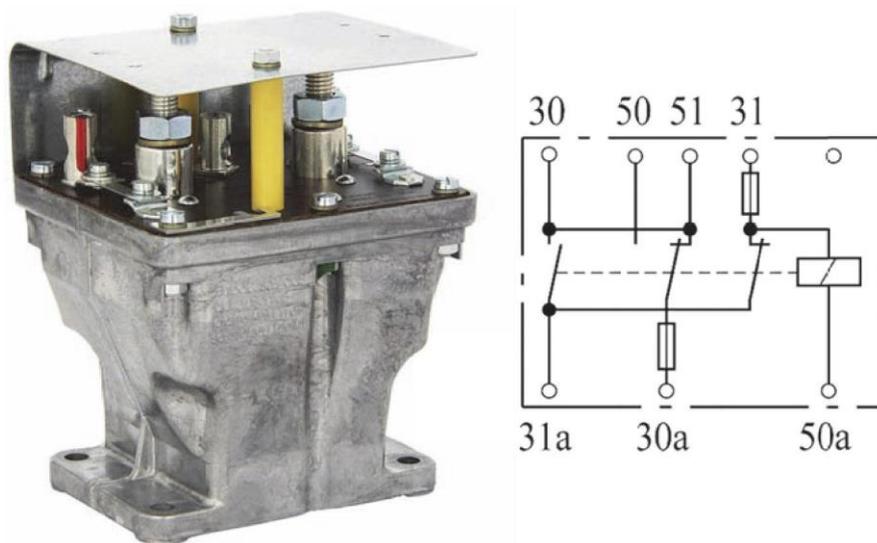


Рис. 12.11. Дистанционный выключатель аккумуляторных батарей

Выключатели «массы» выпускаются как с ручным, так и с дистанционным управлением (рис. 12.12). Выключатель ВК860 (рис. 12.13) - выключатель «массы» с дистанционным управлением состоит из трех основных частей: контактного устройства, электромагнита, установленного на торце его корпуса, и системы передачи усилий от штока электромагнита к контактному устройству.



а)

б)

Рис. 12.12. Выключатели массы:
а - ВК860; б - 1212.3737-05

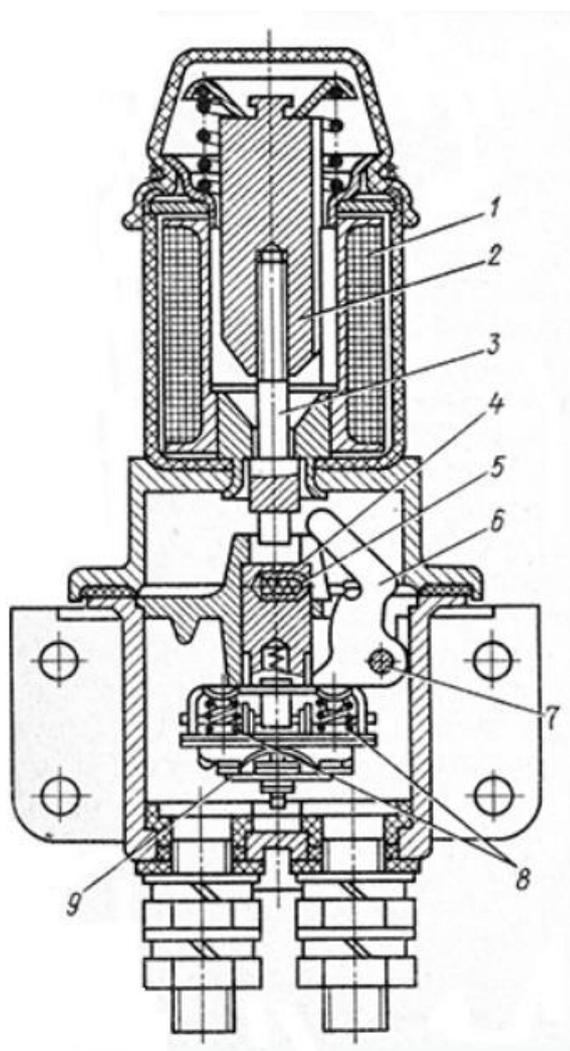


Рис. 12.13. Дистанционный выключатель «массы» автомобиля КамАЗ
1 – обмотка электромагнита; 2 – якорь; 3 – шток; 4 – упругий элемент;
5 – фиксатор; 6 – рычаг; 7 – ось; 8 – пружина; 9 – подвижные контакты

При подаче питания на обмотку 1 электромагнита якорь 2 и ввернутый в него шток 3 передают усилие штоку 4 контактного устройства, который движется вниз. Фиксатор 5, западая в выемку рычага 6 со специальным профилем, сидящего на оси 7, фиксирует контакты выключателя в замкнутом положении. При этом пружины 8 сжимаются. При следующей подаче питания на обмотку 1 электромагнита шток 3 передает усилие на рычаг 6, который, поворачиваясь вокруг оси, утопляет в штоке 4 фиксатор 5, и подвижные контакты 9 под действием пружин 8 размыкают цепь, переходя во второе фиксированное положение. При этом фиксатор 5 занимает другое устойчивое положение. Если аккумуляторная батарея разряжена, включение и выключение выключателя массы можно осуществить нажатием на якорь 2 через резиновый защитный чехол.

Особенностью указанных контакторов является наличие двойного разрыва цепи, повышающего надежность работы устройства, а также наличием двух обмоток – втягивающей и удерживающей, что снижает энергозатраты при их работе.

Режим работы электромагнита выключателя кратковременный, время его включения не более 2 с.

Контактная система выключателя с ручным управлением аналогична системе выключателя с дистанционным управлением.

Таблица 12.1 Параметры и применяемость контакторов

Тип	Напряжение, В			Коммутируемый ток, А	Применяемость
	номинальное	Срабатывания	Отпускания		
КТ 125	12	10	6	100	ГАЗ-3102
КТ-124	24	20	10	100	КамАЗ КрАЗ МАЗ
КТ-129	24	20	10	50	ГАЗ-4905 МАЗ-5335

12.2. Втягивающее реле электростартера

Во всех современных автомобилях используется практически одинаковые схемы систем пуска двигателя, построенная на основе электрического стартера. В системах управления электростартером

предусмотрены электромагнитные тяговые реле, осуществляющие дистанционный запуск двигателя.

Тяговое реле представляет собой комбинацию соленоида и реле и служит для создания усилия на рычаге механизма привода, а также подключения стартерного электродвигателя к аккумуляторной батарее (рис. 12.14). Втягивающее реле выполняет несколько важных функций:

- обеспечение зацепления шестерни стартера с маховиком двигателя;
- подключение обмоток электродвигателя стартера к аккумулятору;
- удержание шестерни стартера в зацеплении с маховиком до момента пуска мотора;
- отключение стартера после пуска двигателя.



Рис. 12.14. Внешний вид втягивающих реле стартеров

Тяговое реле имеет несложную конструкцию, в него входят следующие детали (рис. 12.15):

- втягивающая обмотка 1;
- удерживающая обмотка 2;
- якорь (сердечник) со штоком реле стартера и штоком привода вилки стартера 3;
- контактный диск 4;
- контакты реле стартера 5;
- возвратные пружины 6;
- корпус 7.

Основу реле составляет цилиндрическая втягивающая катушка (она образует соленоид, электромагнит), внутри которой расположен подвижный сердечник (якорь). Поверх втягивающей катушки намотаны витки удерживающей катушки. С одной стороны якоря находится шток, толкающий вилку стартера, этот шток выходит за габариты корпуса, на его конце предусмотрено или отверстие, или перекладина (зависит от модели). С другой стороны якоря расположен шток, оканчивающийся контактным диском реле стартера.

Само реле стартера представляет собой чашку из изоляционного материала, в которую впрессовано два контакта большой площади с нарезанной резьбой (на нее с помощью гаек устанавливаются клеммы). Обычно на внешней стороне крышки между контактами находится бортик, препятствующий возникновению короткого замыкания. Эта крышка с помощью винтов прикручивается к торцу втягивающего реле таким образом, что контакты располагаются напротив контактного диска на штоке якоря.

Вся эта конструкция помещается в цилиндрический металлический корпус. На корпусе втягивающего реле ВАЗ со стороны штока привода вилки может находиться фланец с отверстиями для монтажа к стартеру, либо резьбовые отверстия, высверленные непосредственно в торце корпуса. Это зависит от модели стартера и способа монтажа на нем втягивающего реле.

Схема работы втягивающего реле показана на рисунке 4.15.

При замыкании контактов в замке зажигания срабатывает реле стартера (обычное реле, расположенное в монтажном блоке), которое подает напряжение от аккумулятора непосредственно на втягивающую обмотку втягивающего реле. Под действием возникшего магнитного поля якорь втягивается внутрь обмотки, при этом он производит сразу два действия:

- шток приводит в движение вилку стартера, которая сдвигает обгонную муфту (бендикс) и приводит в зацепление шестерню стартера с венцом маховика;

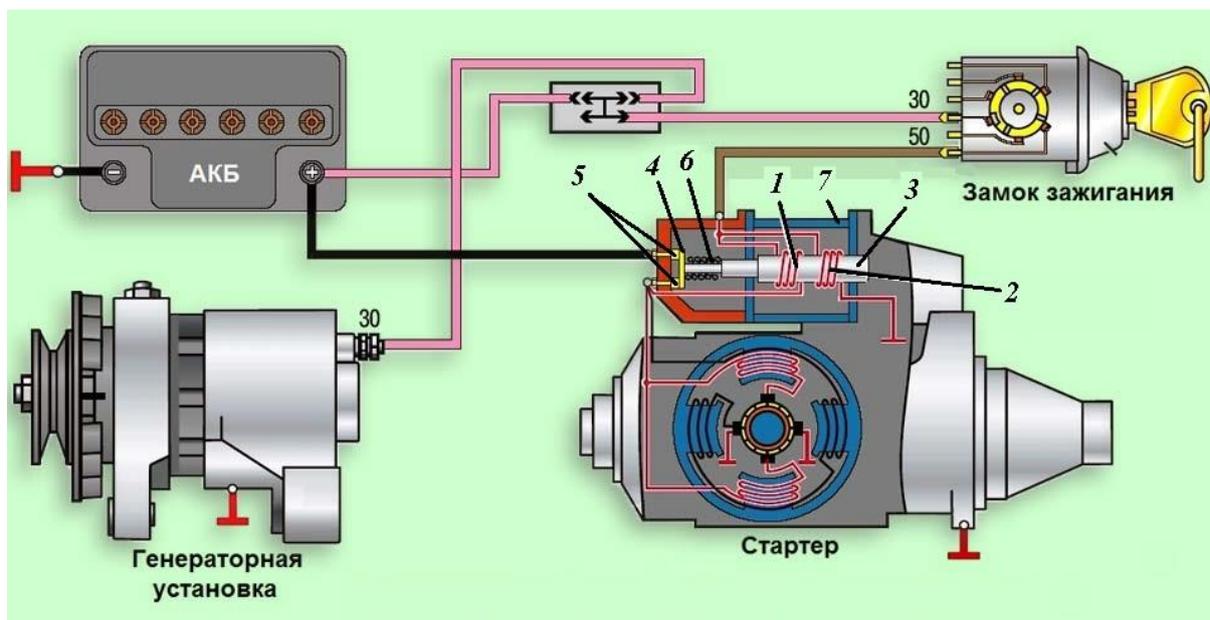


Рис. 12.15. Схема подключения втягивающего реле:

1- втягивающая обмотка; 2 - удерживающая обмотка; 3 - якорь (сердечник) со штоком реле стартера и штоком привода вилки стартера; 4 - контактный диск; 5 - контакты реле стартера; 6 - возвратная пружина; 7 - корпус.

- закрепленный на конце штока диск замыкает контакты реле стартера.

Таким образом, при движении якоря стартер соединяется с маховиком и одновременно подключается к аккумулятору — по двигателю стартера протекает ток, он начинает вращаться, и через несколько секунд происходит пуск двигателя.

В момент включения стартера втягивающая катушка отключается, ток поступает на удерживающую катушку - она необходима для удержания якоря в крайнем положении. Применение удерживающей катушки снижает потребляемую втягивающим реле мощность, так как для удержания якоря нужно затратить значительно меньше энергии, чем для его втягивания. Эта мера снижает общие затраты заряда аккумуляторной батареи в момент пуска двигателя.

После запуска двигателя с помощью ключа зажигания разрывается цепь стартера, удерживающая обмотка тягового реле обесточивается, якорь под действием пружины возвращается в исходное положение, а вместе с этим отводится бендикс и контактный диск от контактов в реле стартера. Стартер одновременно и отключается от аккумулятора, и разъединяется с маховиком двигателя.

12.3. Электрическое реле

Электрическое реле – электрический аппарат, предназначенный производить скачкообразные изменения в выходных цепях при заданных значениях электрических воздействующих величин.

Реле - это компонент, который широко используется в автомобильном электрооборудовании для различных сфер применений. Их количество на один автомобиль может считаться несколькими десятками.

С помощью электрических реле легко осуществлять дистанционное управление различных устройств.

Часто необходимость реле объясняется тем, что оно может управлять высокими токовыми нагрузками, для которых выходная мощность электронного блока управления может оказаться недостаточной.

Реле также используются для разгрузки контактов выключателя зажигания или управления тяговым реле стартера. Выключатель зажигания обычно рассчитан на силу тока около 10 А; однако текущее значение тока потребителей может превысить 10 А, что требует применения разгрузочного реле. Тяговое реле стартера обычно потребляет 70 А в течение этапа зацепления шестерни с маховиком, следовательно, и для этой цепи используется коммутационное реле.

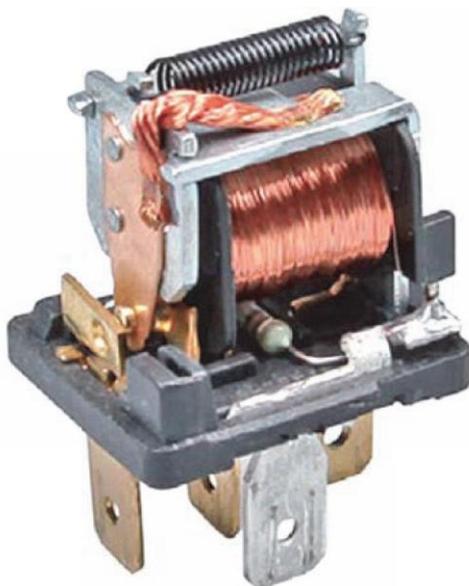


Рис. 12.16. Электромагнитное реле (вид со снятой крышкой)

Электромагнитные реле (ЭМР) представляют собой электромеханические контактные устройства, преобразующие управляющий электрический ток в магнитное поле, которое оказывает силовое скачкообразное действие на подвижное намагниченное или намагничиваемое полем тело, механически связанное с электрическим контактом реле или являющееся подвижной частью этого контакта (рис. 12.17). При возникновении управляющего тока в ЭМР происходит скачкообразное срабатывание контакта, который из разомкнутого (замкнутого) состояния переходит в замкнутое (разомкнутое) состояние.

На работу контактов реле, помимо управляющей электромагнитной силы, существенное влияние оказывают также силы упругой деформации контактных элементов и/или специальной (возвратной) пружины, которые в процессе срабатывания реле препятствуют действию электромагнитной силы, а в ее отсутствие способствуют возвращению контактов в исходное состояние.

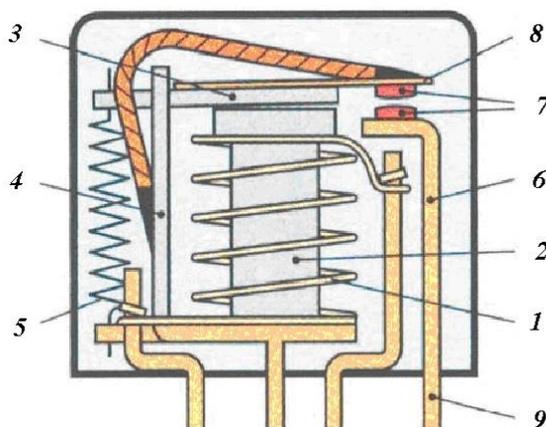


Рис. 12.17. Принципиальная схема электромагнитного реле:
 1 – обмотка; 2 – сердечник; 3 – якорь; 4 – ярмо; 5 – возвратная пружина;
 6 – держатель неподвижного контакта; 7 - контакты; 8 – держатель
 подвижных контактов; 9 выводные контакты

При замыкании или размыкании электрически нагруженного контакта в межконтактном промежутке практически всегда возникает электрический разряд, взаимодействующий с областью контактируемой поверхности материала, что приводит к ее электрофизическому износу. Кроме того, электрический разряд, обладая электропроводимостью, ускоряет процесс замыкания и затягивает процесс размыкания контакта.

Конструкции ЭМР в зависимости от принципа силового воздействия магнитного поля на подвижный элемент контакта подразделяются на два основных вида:

- реле с магнитоуправляемым якорем, в которых подвижное магнито-управляемое тело-якорь, который либо несет на себе подвижный контактный элемент, либо механически воздействует на него посредством толкателя, поводка или им подобного передающего органа;

- реле с магнитоуправляемым контактом, в которых магнитоуправляемым телом является сам подвижный элемент контакта.

Магнитная цепь неполяризованных (нейтральных) электромагнитов содержит только низкокоэрцитивные (магнитомягкие) ферромагнитные элементы. Это позволяет не только легко намагничивать и размагничивать подвижные элементы магнитной цепи, но и обеспечивает взаимное притяжение элементов или их притяжение к полюсу независимо от направления тока в обмотке электромагнита.

Существует несколько стандартизированных типоразмеров реле: мини, микро и макси (рис. 12.18).

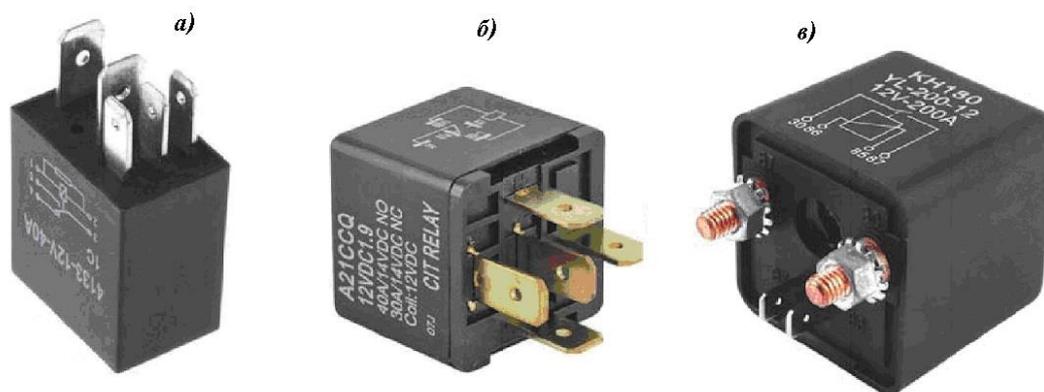


Рис. 12.18. Типоразмеры автомобильных коммутационных реле:

а - микро, б - мини, в - макси

Реле типоразмера макси получило название *силовое*, так как рассчитано, как правило, на коммутацию больших токов (70-200 А) и отличается клеммами увеличенной площади.

Контактные клеммы реле, к которым подключается электропроводка, могут быть «ножевого» типа (для установки реле в разъем колодки), а также под винтовую клемму (обычно у особо мощных реле или реле устаревших типов). Контакты бывают «белыми» или «желтыми».

Желтые и красные - латунь и медь, матовые белые - луженая медь или латунь, блестящие белые - сталь, покрытая никелем. Луженые латунь и медь не окисляются, но голая латунь и медь - лучше, хотя и склонны темнеть, ухудшая контакт.

Никелированная сталь также не окисляется, но обладает увеличенным сопротивлением. Неплохо, когда силовые выводы - медные, а выводы обмотки - никелированные стальные. Корпус автомобильного реле не только защищает от внешних воздействий, но и позволяет символично отображать информацию о данном конкретном реле: это может быть фирма и страна производитель, принципиальная схема работы и, конечно же, нумерация клемм.

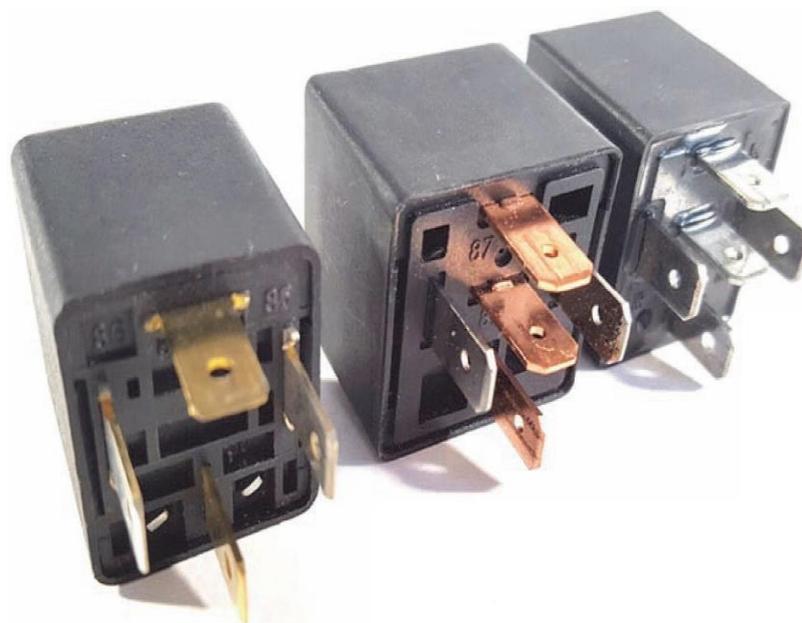


Рис. 12.19. Внешний вид контактов реле

Нумерация клемм реле производится по стандарту автомобильной электрики - DIN 72552 (таблица 4.2). Это сделано для универсальности каждого реле и удобства как производителей, так и автоэлектриков.

Помимо обозначения клемм на реле, на верхней его части можно увидеть буквенно-цифровые данные, указывающие на рабочие характеристики конкретного реле.

Расположение клемм реле стандартизировано так же, как и нумерация выводов. Типичное расположение и нумерация клемм со стороны, монтируемой в колодку или блок реле и предохранителей, показано на рис. 12.20.

Основные параметры реле:

- время срабатывания реле - характеризует промежуток времени от момента подачи сигнала на вход реле до момента начала действия на силовую цепь;

- управляемая мощность - это мощность, которой способны управлять контакты реле при коммутации цепи;

Таблица 12.2. Обозначение клемм реле по DIN 72552

Обозначение клеммы	Значение	Другое обозначение
85	Конец обмотки реле (минус)	85
86	Начало обмотки реле (плюс)	86
87	Общий контакт	30
87a	Нормально замкнутый контакт	87
87b	Нормально замкнутый контакт 2	-
88	Общий контакт 2	-
88a	Нормально разомкнутый контакт	88
88b	Нормально разомкнутый контакт 2	-

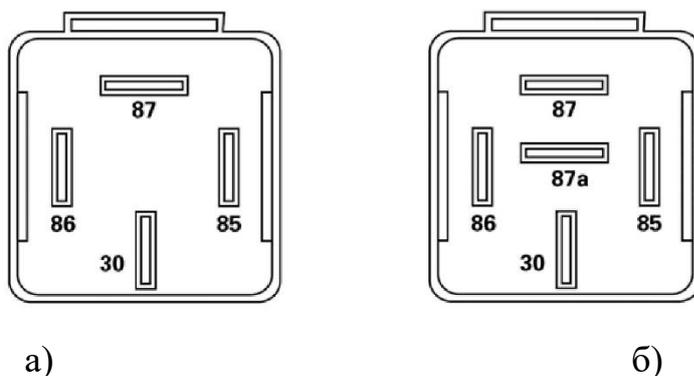


Рис. 12.20. Расположение и нумерация клемм коммутационных реле типоразмера мини:

а - четырехконтактное, б - пятиконтактное

- напряжение срабатывания - это наименьшее напряжение, требуемое для чувствительного элемента реле для перехода в рабочее состояние;

сопротивление обмотки - обычно составляет от 50 до 100 Ом;

- напряжение отпускания - максимальная величина напряжения

на клеммах обмотки реле, при котором якорь отпадает в исходное положение;

- частота коммутации с нагрузкой - частота, с которой может осуществляться подключение и отключение силовой цепи.

Таблица 12.3. Паспортные характеристики реле 75.3747

Параметры реле	Напряжение, В			Сила тока нагрузки, А
	номинальное	срабатывания	отпускания	
75.3747	12	Не более 8	1,5-5,5	20/30

Как правило, ток, который указан на крышке реле, относится к максимальному току при переключении, который не вызывает разрушения внутренних контактов. В реальных условиях реле может долговременно выдерживать без перегрева только две третьих от этого тока. То есть если на крышке написано 30 А 12 В, то можно рассчитывать только на 20 ампер при долговременной работе в условиях повышенной температуры под капотом.

В зависимости от того, какими контактами оснащено реле различают замыкающее, размыкающее и переключающее реле.

12.3.1. Замыкающее реле

Клеммы 86 и 85 являются выводами обмотки реле. Как правило, клемма 86 связана с положительным напряжением, а клемма 85 связана с источником отрицательного напряжения («массой»),

Клемма 87 называется *общим выводом*. Общий вывод обычно связан с положительным напряжением, но он может быть связан и с «массой», если этого требует конкретная электрическая схема. Клемма 87а связана с нормально разомкнутым контактом реле. Нормально разомкнутый означает, что при отсутствии напряжения контакт реле разомкнут. Поэтому сопротивление между контактами 87 и 87а практически равно бесконечности до тех пор, пока

на обмотку реле не подано напряжение, что означает, что достаточный ток течет через обмотку реле, чтобы заставить электромагнит преодолевать натяжение пружины и изменять состояние контактов.

При срабатывании реле происходит ощутимый щелчок, и движение якоря заставляет нормально разомкнутый контакт замкнуться, обеспечивая низкоомную связь между общим выводом (87) и выводом (87а) (рис. 12.21).



Рис. 12.21. Схема реле с замыкающими контактами

Пример использования такого реле для управления обогревом заднего стекла приведен на рис. 12.22.

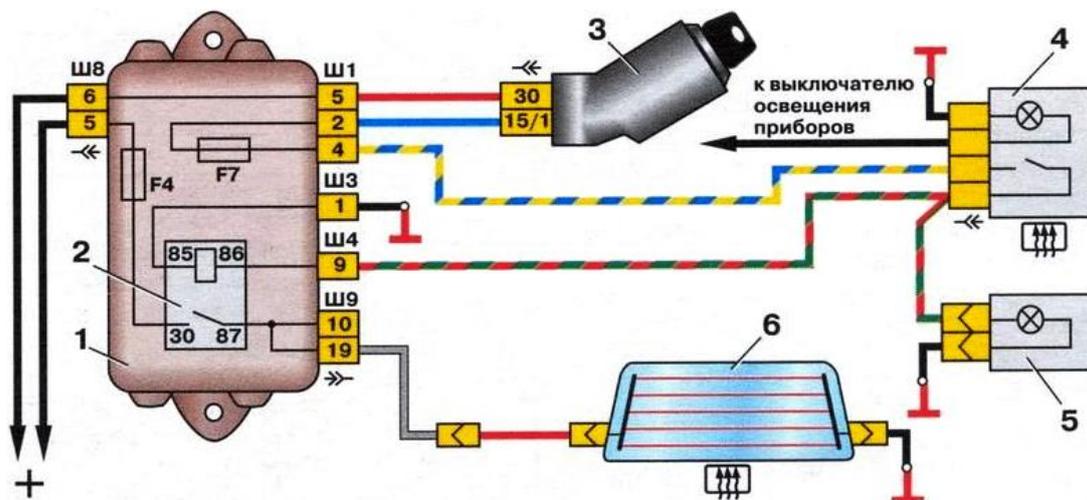


Рис.12.22. Коммутация цепи обогрева заднего стекла ВА3-2101:
 1- блок реле и предохранителей; 2 – реле обогрева заднего стекла; 3 – замок зажигания; 4 – выключатель обогрева заднего стекла; 5 – индикатор включения обогрева заднего стекла на приборной панели; 6 - нагревательный элемент обогрева заднего стекла.

12.3.2. Размыкающее реле

Клемма 88а связана с нормально замкнутым контактом реле. Нормально замкнутый означает, что при отсутствии напряжения контакт реле замкнут. Поэтому сопротивление между контактами 87 и 88а практически равно нулю до тех пор, пока на обмотку реле не подано напряжение, что означает, что достаточный ток течет через обмотку реле, чтобы заставить электромагнит преодолевать натяжение пружины и изменять состояние контактов.

При срабатывании реле движение якоря заставляет нормально замкнутый контакт разомкнуться, обеспечивая разрыв электрической цепи между общим выводом (87) и выводом (88а) (рис. 12.23).

Применяются таких реле для прерывания потребителей II группы во время запуска двигателя (основные фары, подогрев заднего стекла, радио и т. д.), блокировки цепей и др.



Рис. 12.23. Схема реле с размыкающими контактами

12.3.3. Переключающее реле

Переключающее реле содержит два контакта, один из которых является нормально замкнутым, а другой нормально разомкнутым (рисунок 4.24). Общий вывод обоих контактов обозначается как 87. Низкоомное электрическое соединение существует между общим выводом 87 и клеммой 88а, когда реле обесточено. Между выводами 87 и 87а, напротив, сопротивление стремится к бесконечности при отсутствии напряжения на обмотке реле. При подаче напряжения на обмотку си-

туация меняется на противоположную: между клеммами 87 и 88а образуется разрыв электрической цепи, а между выводами 87 и 87а - замыкание.

Применение: переключение двух потребителей, например с ближнего света на дальний в двухнитевой лампе накаливания.

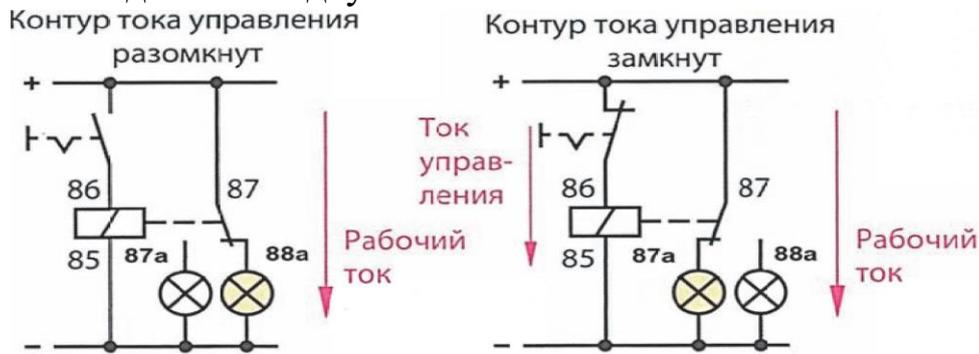


Рис. 12.24. Схема реле с переключающими контактами

12.3.4. Реле с задержкой включения/выключения

Реле времени предназначены для коммутации электрических цепей постоянного тока с номинальным напряжением 12 и 24 В с фиксированным временным интервалом. Как следует из названия, данные реле при подаче на них напряжения замыкают или размыкают контакты не сразу, а через некоторое время. В автомобиле такие реле могут найти различное применение, например пауза при включении фонарей заднего хода (задней камеры), пауза при включении печки после запуска двигателя, продление времени турботаймера и т. д.

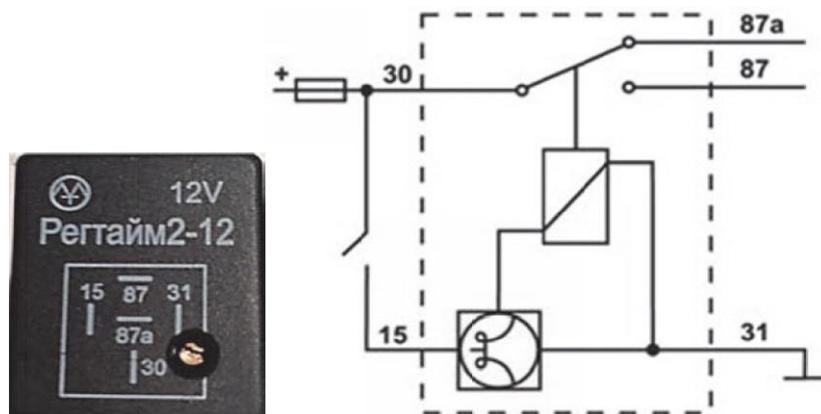


Рис. 12.25. Реле с регулировкой времени срабатывания / отпускания

12.3.5. Реле с диодом

Помимо защиты включаемых реле приборов, порой требуется защита и элементов цепи самой обмотки. Дело в том, что после снятия напряжения с обмотки в нагрузке возникает обратный ток (напряжение самоиндукции) с амплитудой, меньшей или равной приложенного напряжения к обмотке в работе и обратный по полярности. Возникновение этого тока может привести к выходу обмотки из строя.

Диод, включенный параллельно обмотке (рис. 12.26), гасит возникающее обратное напряжение, тем самым защищая обмотку от повреждения.

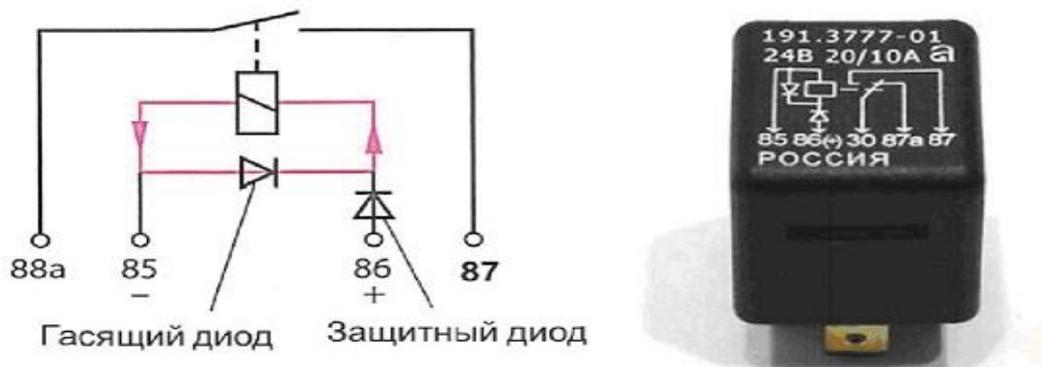


Рис. 12.26. Схема и внешний вид реле с диодом

Помимо диода, включенного параллельно обмотке реле, можно встретить и диод, включенный последовательно с обмоткой. Он тоже выступает в качестве защиты от обратных токов, только он не гасит этот ток. При возникновении обратного тока в обмотке этот диод не пускает его в схему, то есть он работает только в одном направлении - к обмотке.

Стоит также помнить, что любой диод в цепи работы обмотки реле автоматически делает реле поляризованным, то есть требующим соблюдения полярности при подключении.

12.3.6. Реле с резистором

Реле с помехоподавляющим резистором выполняет ту же роль, что и реле с диодом. Работает чуть хуже, чем диод, но зато не делает реле поляризованным. Резистор ставится для защиты управляющих цепей от всплеска, возникающего при размыкании цепи. При параллельном подключении (рис. 12.27) напряжение на резисторе и на катушке реле будет одинаковым, и реле все равно сработает. Такой резистор защищает от импульсных помех, допустим, при наводке от первичного оборудования. Когда источником напряжения являются помехи, тогда ток делится обратно пропорционально сопротивлениям обмотки и резистора, и реле не срабатывает.

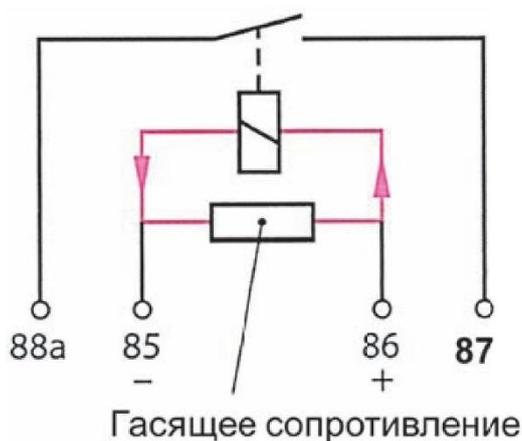


Рис. 12.27. Схема и внешний вид реле с резистором

12.4. Защитная коммутационная аппаратура

Основными типами устройств защитной аппаратуры автомобилей являются плавкие предохранители, автоматы-прерыватели, термометаллические предохранители и позисторы.

12.4.1. Плавкие предохранители

В автомобилях нашли широкое применение *плавкие предохранители*, в которых за счет расплавления одного или нескольких своих элементов, имеющих определенную конструкцию и размеры, размыкается цепь, в которую они включены, отключая ток, превышающий заданное значение в течение определенного времени.

Предохранитель - коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенную величину

Предохранители применяются для защиты цепей питания нагрузки от токов короткого замыкания и токов перегрузки при неисправности в схеме электрооборудования автомобиля, неправильного включения "потребителей", замыкания автомобильных проводов на массу и в других случаях. Большинство современных предохранителей - штекерные предохранители типов микро, мини, стандартный и макси (рис. 12.28).

Штекерные предохранители типов микро, мини и стандартного относятся к быстродействующим предохранителям. Это означает, что предохранитель сработает относительно быстро, если электрический ток через предохранитель превысит номинальное значение. Штекерные предохранители типа макси являются предохранителями с временной задержкой. Они часто используются, чтобы защитить цепи, связанные с устройствами с высокими пусковыми токами, такими как электрические двигатели.

У штекерного предохранителя обычно цветной полупрозрачный пластмассовый кожух. Это позволяет предохранителю быть видимым для контроля. У предохранителя, сгоревшего из-за небольшой перегрузки, может быть маленький видимый разрыв в плавкой вставке с минимальным обесцвечиванием пластмассового кожуха.

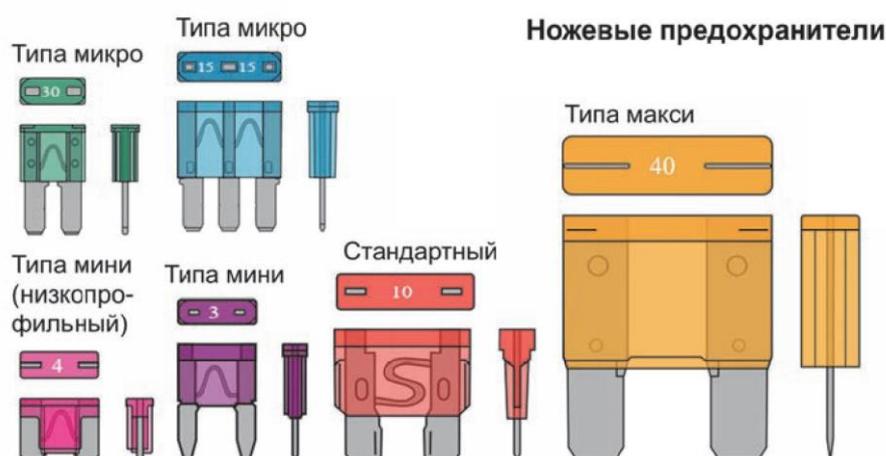


Рис. 12.28. Штекерные плавкие предохранители

Конструктивно плавкий предохранитель состоит из корпуса-держателя и плавкой вставки (рис. 12.29). Плавкая вставка может быть проволочная и ленточная. При определенной силе тока короткого замыкания плавкая вставка нагревается до температуры плавления металла, из которого она выполнена, и расплавляется. Время t срабатывания предохранителя зависит от отношения силы тока нагрузки I_n к силе номинального тока $I_{п.ном.}$ предохранителя и определяется по его *время-токовой характеристике* (кривой зависимости времени отключения плавкой вставки от ожидаемого тока в установленных условиях срабатывания).

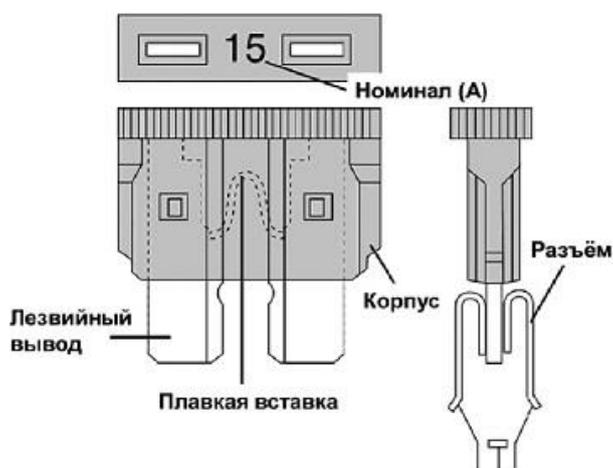


Рис. 12.29. Устройство штекерного плавкого предохранителя

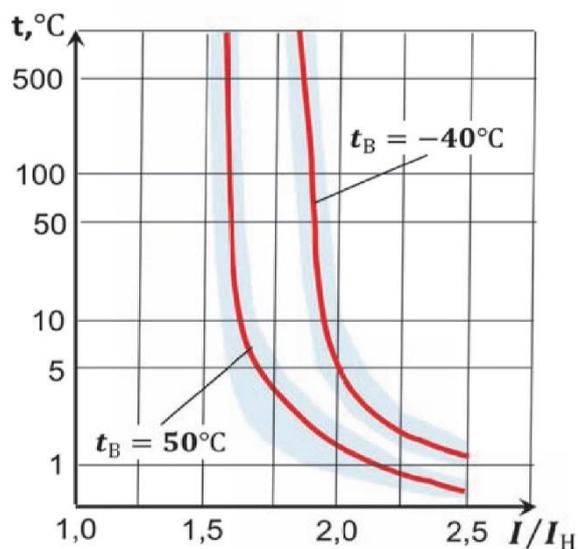


Рис. 12.30. Время-токовая характеристика плавкого предохранителя

Предохранители рассчитаны на определенный ток срабатывания. Номинальные значения тока срабатывания наиболее распространенных предохранителей приведены в таблице 4.

Номинальное напряжение указывает на максимальное напряжение, на которое рассчитан предохранитель. Большинство предохранителей современных автомобилей рассчитаны на номинальное напряжение 32 В.

Таблица 12.4. Цветовая маркировка корпуса штекерных плавких предохранителей

Номинал предохранителя, А	Цвет предохранителя
5	Желто-коричневый
7,5	Коричневый
10	Красный
15	Синий
20	Желтый
25	Белый (бесцветный)
30	Зеленый
40	Оранжевый
50	Красный
60	Синий
70	Коричневый
80	Светло-желтый
100	Сиреневый

Предохранители патронного типа

При защите силовых цепей, в момент срабатывания предохранителя создаются условия для возникновения и устойчивого горения дуги, что может снижать эффективность предохранителей и явиться причиной возникновения воспламенения. Для этой цели применяют сверхмощные предохранители патронного типа, в которых предусмотрены специальные термоизолирующие элементы. На рис. 12.31 показаны внешний вид и конструкция предохранителей патронного типа.

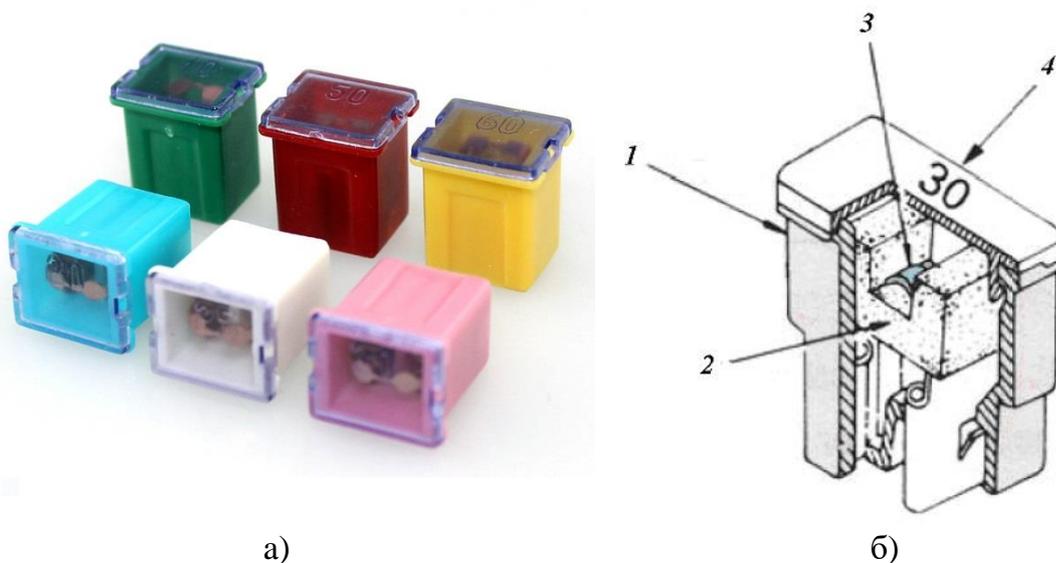


Рис. 12.31 - Предохранителя патронного типа:
а- внешний вид, б - устройство

1 - корпус; 2- эндотермитический блок; 3 - плавкая вставка; 4 – номинал тока (А).

Предохранители патронного типа находят все большее распространение и частично заменяют штекерные плавкие предохранители. Они также известны как плавкие предохранители типа Pcsifc и доступны в номиналах до 150 А.

Предохранители типа MEGA

Предохранители MEGA являются результатом новейших технических разработок, и используются в качестве более безопасной альтернативы стандартным предохранителям. Они часто используются, чтобы защитить линию питания между генератором и аккумуляторной батареей, в случае ее короткого замыкания или пробоя диодов выпрямительного моста генератора на массу. Плавкие предохранители Mega Fuse предназначены для защиты цепей электропитания по постоянному току в диапазоне от 60 до 300 ампер.

Основными преимуществами указанных предохранителей являются:

- низкая склонность к искрению при срабатывании плавкого элемента, за счет специального полиамидного материала и конструктивного исполнения корпуса предохранителя;
- жесткость конструкции, практически отсутствует его деформация при установке и эксплуатации;



Рис. 12. 32. Плавкие предохранители типа MEGA

- болтовое соединение обеспечивает надежный электрический контакт, снижая тем самым переходное сопротивление предохранителя и возможный нагрев при прохождении больших токов;
- малые габариты.

Технические характеристики предохранителей MEGACOMPACT приведены в таблице 12.5

Таблица 12.5. Параметры предохранителей MEGACOMPACT

	Параметр	Значение
1	Производитель	МТА
2	Типоразмер	ленточный MEGA
3	Вид	автомобильный
4	Номинальный ток (цветовая кодировка)	80A (red) 100A (yellow) 125A (green) 150A (orange) 175A (white) 200A (blue) 225A (beige) 250A (pink)
5	Максимальное напряжение	32 В
6	Рабочая температура	-40°C +125°C
7	Размер (ДхШхВ, мм)	55 x 15 x 7.8
8	Материал корпуса	PP GF30

12.4.2 Автоматы-прерыватели

На автомобилях может устанавливаться штатное или дополнительное оборудование с высоким энергопотреблением — аудиосистемы, обогревательные устройства и т.д. Защита таких устройств ложится на плечи автоматов-прерывателей.

Автомат-прерыватель (предохранитель-автомат, автоматический предохранитель) — устройство коммутации и защиты, предназначенное для подключения и ручного и/или автоматического (аварийного) обесточивания цепей питания сильноточного дополнительного оборудования с напряжением питания до 48 вольт.

На автомат-прерыватель возложено несколько функций:

- коммутация цепей питания — ручное включение и выключение сильноточного оборудования;

- автоматическое обесточивание оборудования при чрезмерном потреблении тока;

- аварийное автоматическое обесточивание оборудования в случае короткого замыкания в цепях питания — выполнение функции многократного предохранителя;

- в некоторых типах автоматов — индикация подключения оборудования к источнику питания.

Автомат питания используется на транспортных средствах в качестве коммутационного устройства и предохранителя для защиты оборудования, в цепях питания которого действуют высокие токи — до 50-200 и более ампер. К такому оборудованию относятся, в первую очередь, аудиосистемы, усилители которых развивают мощность вплоть до 3500-3600 Вт. Также автоматические предохранители применяются для подключения нагревательных/отопительных приборов и специальной аппаратуры. Все автомобильные автоматические предохранители имеют принципиально одинаковое устройство. Основу автомата составляет *расцепитель*, связанный с контактной системой и приводным устройством. Расцепитель соединен с клеммами, которые включаются в цепь питания защищаемого оборудования, обеспечивая их соединение и разъединение в зависимости от режима работы.

В большинстве автоматов используются тепловые расцепители. Его главная деталь — плоская биметаллическая пластина, жестко связанная с одной из клемм автомата (как правило — с выводной). На свободной стороне пластины расположен рычаг отключения автомата,

связанный с кнопкой на корпусе устройства. Здесь же, но под пластиной, установлен контакт, связанный со второй клеммой автомата, над этим контактом на пластине расположена контактная площадка.

Между контактами может проходить диэлектрическая пластинка, установленная на поворотной оси с рычажком. Вся эта конструкция заключена в пластиковый корпус, на переднюю панель которого выведена кнопка отключения и рычажок включения устройства (рис. 12.33)

Работает расцепитель следующим образом. В выключенном состоянии диэлектрическая пластинка на поворотной оси расположена между контактом и контактной площадкой биметаллической пластины — цепь разомкнута, оборудование обесточено. Для включения рычажок поворачивается в положение «On» (выполняется «взведение» автомата) и диэлектрическая пластинка выходит из зазора между контактами. За счет своей упругости биметаллическая пластина отгибается и контактной площадкой опирается на контакт входной клеммы — цепь замыкается, на оборудование подается напряжение питания. Для ручного выключения нужно нажать на кнопку — связанный с ней рычаг поднимет биметаллическую пластину, разъединив контакты, цепь разорвется и оборудование будет обесточено. Одновременно с этим связанная с рычагом или самой биметаллической пластиной пружина повернет ось рычажка — диэлектрическая пластинка войдет в зазор между контактами, предотвратив их замыкание. После снятия усилия с кнопки автомат-прерыватель останется разомкнутым.

Автоматическое отключение теплового расцепителя выполняется за счет нагревания биметаллической пластины. В случае повышения силы тока в цепи питания (вследствие превышения безопасной мощности или при коротком замыкании) биметаллическая пластина нагревается и изгибается вверх — контакты размыкаются и цепь разрывается. При этом происходят все описанные выше процессы — рычажок отводится в сторону и в зазор между контактами вводится диэлектрическая пластина. После устранения причины срабатывания автомата его можно вновь включить.

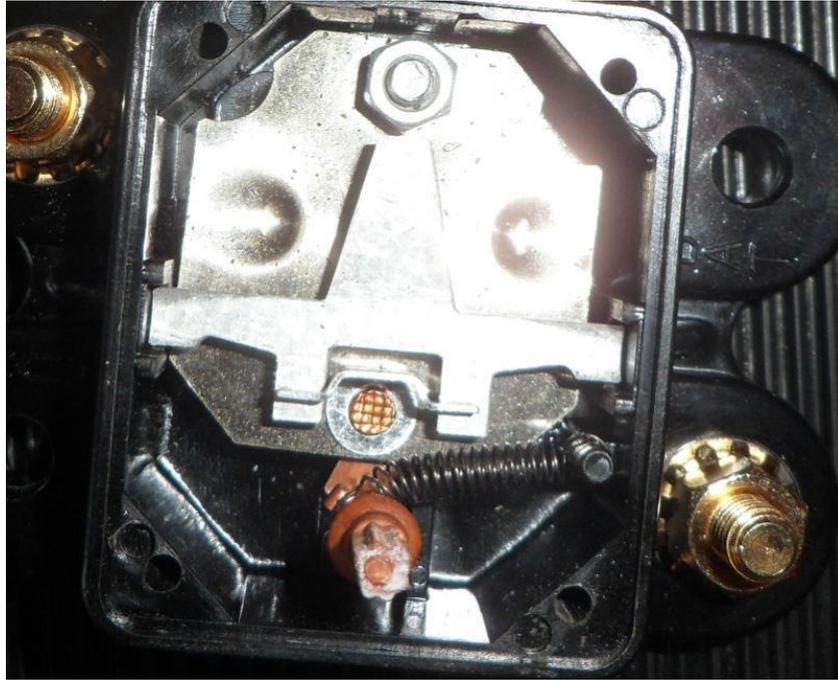


Рис. 12.33. Конструкция теплового расцепителя

Дополнительно автомат-прерыватель может оснащаться электромагнитным расцепителем мгновенного действия. Такой расцепитель представляет собой соленоид, якорь которого соединен с контактной группой. При коротком замыкании ток в обмотке возрастает, якорь втягивается в катушку, отводит контакт и обесточивает цепь. Однако такой расцепитель применяется нечасто, так как он приводит к некоторой потере тока, что для автомобильного электрооборудования неприемлемо.

Для контроля работы автомата может использоваться индикаторный светодиод — он включается и выключается в соответствии с положением контактов устройства.

Автоматы-прерыватели классифицируются по типу корпуса, типу и размеру клемм, и электрическим характеристикам.

Автоматы могут помещаться в различные корпуса:

- обычные корпуса без защиты от негативных факторов окружающей среды;
- влагозащищенные корпуса, иногда — с дополнительными крышками для защиты клемм;
- корпуса в морском исполнении — герметичные корпуса, полностью защищенные от воды, солей, агрессивных газов и т.д., применяются на судах.

При этом автоматические предохранители могут иметь различный форм-фактор:

- обычный прямоугольный корпус;
- цилиндрический корпус в форм-факторе корпуса под мощные плавкие предохранители;
- корпуса специальной формы для монтажа в штатные установочные места (обычно это судовые автоматы).

На всех корпусах выполнены монтажные проушины (кронштейны) и установлены клеммы различных типов (рис. 12.34):

- резьбовые клеммы — болты с гайками и шайбами под витые петли, отформированные на проводниках, а также под клеммы в виде колец и лопаток;

- винтовые зажимы — разъемные клеммы, половины которых сжимаются винтами;

- зажимные цанговые клеммы — клеммы в виде разрезных втулок с резьбой, на которую наворачивается гайка для обжима проводника.

Основными характеристиками автоматов-прерывателей являются:

- номинальный ток отключения;
- номинальное напряжение;
- тип и размеры клемм.

Номинальный ток отключения обязательно указывается на корпусе устройства. На автомобилях и ином транспорте используются автоматы с током отключения от 50 до 150 А, что для 12-вольтовой бортовой сети соответствует максимальной мощности оборудования 600-1800 Вт, а для 24-вольтовой - соответственно от 1200 до 3600 Вт.



Рис. 12.34. Автоматы-прерыватели с различным исполнением клемм:
а – резьбовые; б – винтовые; в - цанговые

Номинальное напряжение автоматов обычно лежит в двух пределах – либо до 24, либо до 48 В.

Что касается размера клемм, то здесь возможны различные варианты. Обычные резьбовые клеммы могут использоваться для соединения с проводами диаметром до 8 мм. Цанговые и винтовые клеммы бывают разных размеров, но они соответствуют принятой системе измерения сечения проводов в калибрах GA. Сегодня такие клеммы бывают двух основных типов — для проводов калибром 8 – 4 GA (диаметром 3,26 и 5,19 мм) и для проводов калибров 8 – 0 GA (диаметром от 3,26 до 8,25 мм).

12.4.3. Термобиметаллические предохранители

Термобиметаллические предохранители многократного действия еще называют прерывателями. Если биметаллическая пластина будет достаточно нагрета, она изогнется и заставит пару контактов прервать электрический ток в цепи.

В прерывателях используются свойства термобиметаллической пластины изгибаться при нагреве (такая пластина состоит из двух слоев металла, имеющих различные значения температурного коэффициента линейного расширения). Один слой пластины выполнен из инвара (сплава железа с 36 % никеля) и имеет очень малый коэффициент линейного расширения, а второй (стальной) слой пластины имеет больший коэффициент линейного расширения.

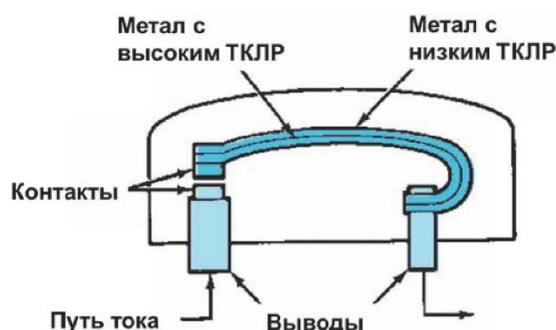


Рис. 12.35. Термобиметаллический предохранитель (прерыватель)

Когда прерыватель остывает, он снова может быть перезагружен, что заставляет контакты замыкаться и восстанавливать электрический ток в цепи. Поскольку прерыватель может быть перезагружен, он

имеет преимущество перед плавкими предохранителями, которые должны быть заменены после срабатывания. Как и у плавких предохранителей, у прерывателей есть номинальный ток и номинальное напряжение. Прерыватели обычно требуют больше времени на срабатывание, чем сопоставимый предохранитель такого же номинального тока. Таким образом, они обладают временной задержкой. Условное графическое изображение термобиметаллического предохранителя (прерывателя) представлено на рисунок 12.36.

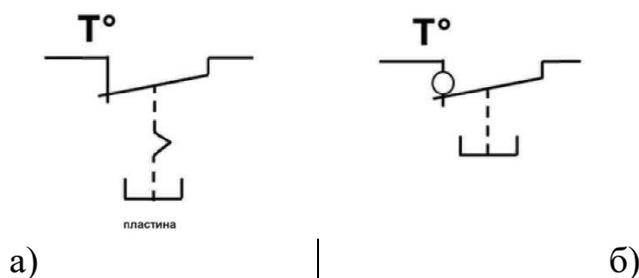


Рис. 12.36. Термобиметаллический предохранитель (прерыватель):
а - с ручным возвратом; б - с автоматическим возвратом

Прерыватели по классификации SAE разделены на три различных категории: тип *I*, тип *II* и тип *III*. Эти три категории описывают тип механизма восстановления прерывателя.

Прерыватель типа *I*, показанный на рис. 12. 35, являются устройством с автоматическим восстановлением. Восстановление происходит автоматически без вмешательства оператора после остывания биметаллической пластины. Если ток в цепи превышает пределы срабатывания, прерыватель будет размыкаться и замыкаться неоднократно. Прерыватели типа *I* обычно используются в стеклоочистителе ветрового стекла и цепях головной фары, где автоматическое восстановление особенно необходимо. Однако постоянное срабатывание контактов прерывателей типа *I* может повредить контакты прерывателя в результате многократной коммутации тока большой силы.

Автоматические прерыватели SAE типа *II* являются модифицированными устройствами автоматического восстановления (рисунок 4.37). Автоматические прерыватели типа *II* автоматически восстанавливаются после устранения причины избыточного тока в цепи. Кроме

того, прерыватели типа *II* восстанавливаются, когда напряжение питания для автоматического прерывателя, например напряжение зажигания, отключается на несколько минут.

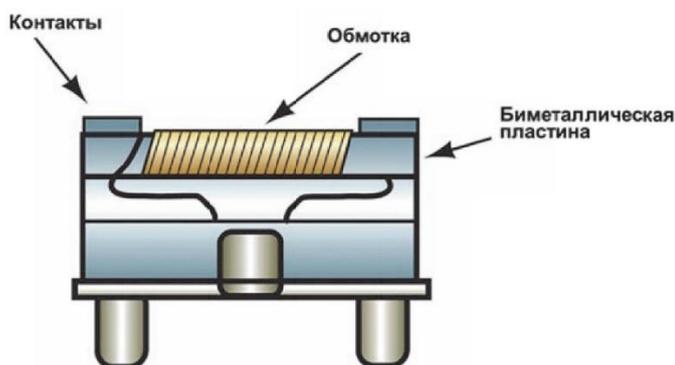


Рис. 12.37. Прерыватель типа *II*

Прерыватели типа *II* содержат нагревательную обмотку, которая заставляет биметаллическую пластину изгибаться, когда устройство проводит слишком большой ток. Прерыватели типа *II* сконструированы таким образом, что ток через нагревательную обмотку продолжается даже после срабатывания (размыкания) автоматического прерывателя. Ток через нагревательную обмотку уменьшается только после того, как отключено питающее напряжение. В результате биметаллическая пластина охлаждается и автоматически замыкает электрическую цепь так же, как прерыватель типа *I*. Прерыватели SAE типа *III* являются устройствами ручного восстановления, как показано на рис. 12.38. После срабатывания прерывателя становятся доступными всплывающая кнопка или рычаг.

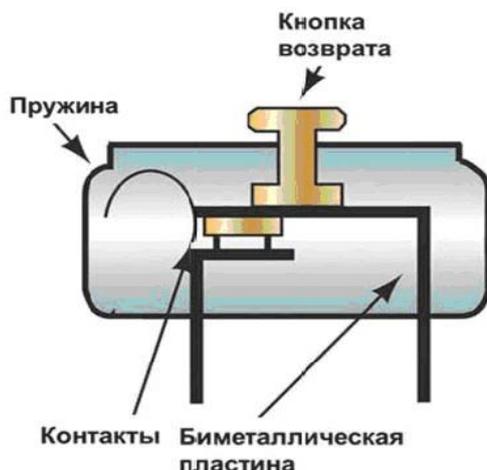


Рис. 12.38. Прерыватель типа *III*

После того, как биметаллическая пластина достаточно охладится, кнопка может быть нажата для восстановления электрической цепи. Нажатие кнопки возврата до момента остывания биметаллической пластины заставит кнопку выскакивать вверх при отпускании. Если причина избыточного тока не устранена после охлаждения биметаллической пластины, автоматический прерыватель снова сработает при ее нагреве.

На современных автомобилях распространены штекерные прерыватели. Большинство штекерных автоматических прерывателей разработаны с таким условием, чтобы они обладали теми же присоединительными размерами, что и штекерные предохранители, и могли устанавливаться на штатные места в блоке реле и предохранителей. Однако габаритные размеры автоматических прерывателей больше, чем у плавких предохранителей (рис. 12.39).

Корпус или кнопка возврата большинства прерывателей штекерного типа имеют такое же цветовое кодирование, что и штекерные предохранители такого номинала.



Рис. 12.39. Прерыватель штекерного типа

Время-токовая характеристика термобиметаллических предохранителей показана на рис. 12. 40. Устройство термобиметаллического предохранителя непрерывного действия показано на рис. 12.41. При прохождении по биметаллической пластине 2 большого тока она из-за разного теплового расширения образующих ее металлов прогибается. При этом контакт 1 размыкается, пластина остывает и возвращается в исходное положение. Контакт 1 при этом замыкается, и процесс повторяется.

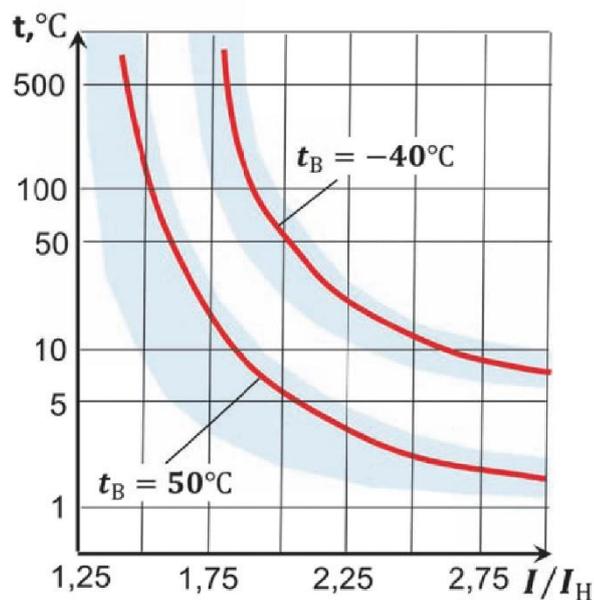


Рис. 12.40. Время-токовая характеристика термобиметаллических предохранителей

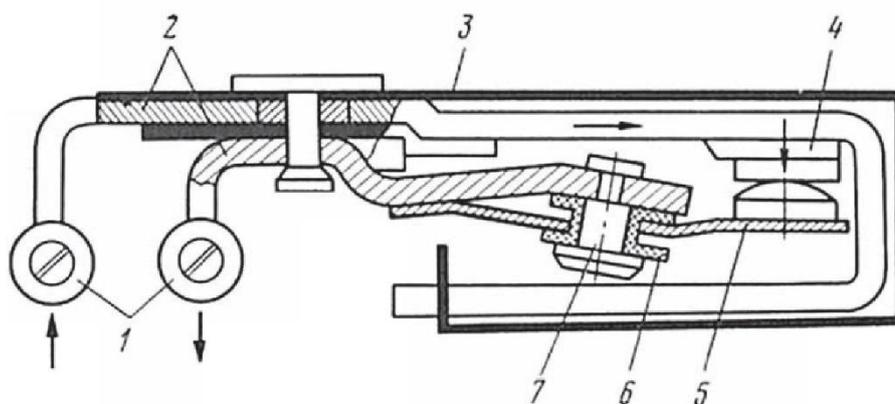


Рис. 12.41. Устройство термобиметаллического предохранителя непрерывного действия:

1 - выводы, 2 - контактные пластины, 3 - изолятор, 4- посеребрённый контакт, 5 - упругая биметаллическая пластина, 6 - пластмассовая шайба, 7 - упор

Если причина, вызывающая увеличение силы тока, не устранена, то контакты предохранителя будут вибрировать, ограничивая этим силу тока в допустимых пределах. На рисунке 4.42 приведено устройство термобиметаллического предохранителя однократного действия. Такие

предохранители устанавливаются в цепях приборов освещения, звукового сигнала и др.

Когда сила тока в цепи предохранителя меньше предельного значения, контакты изогнутой биметаллической пластины 2 соединены с контактами, укрепленными в корпусе. При прохождении через предохранитель тока, превышающего допустимый, биметаллическая пластина 2 со щелчком разомкнет контакты и останется в положении, показанном пунктиром. После устранения повреждения в проводке для замыкания цепи нужно вернуть пластину в первоначальное положение, нажав на кнопку 1 предохранителя.

Регулировка предохранителя на требуемую силу тока производится изменением натяжения биметаллической пластины регулировочным винтом 4 после ослабления контргайки.

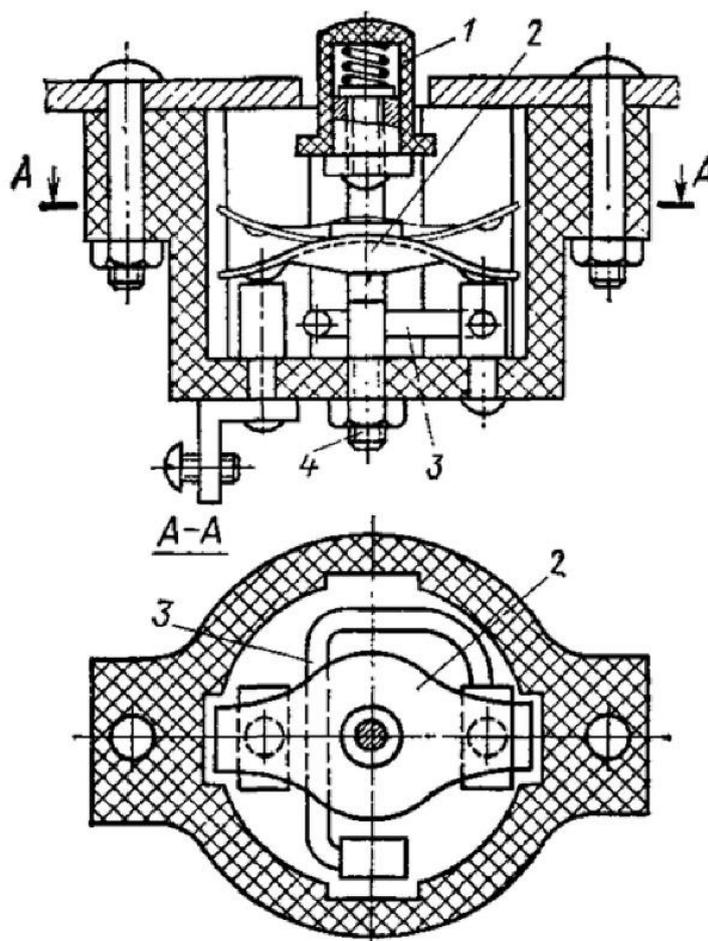


Рис. 12.42. Устройство термобиметаллического предохранителя однократного действия

12.4.4. Позисторы

В течение многих лет в автомобилях используются защитные устройства с положительным температурным коэффициентом (англ. - Positive Temperature Coefficient, PTC).

Положительным температурным коэффициентом обладает большинство проводников, сопротивление которых увеличивается по мере увеличения температуры проводника. Если бы зависимость сопротивления проводника от его температуры была нанесена на график ХУ, линия поднималась бы слева направо, как показано на рис. 12. 43. Это горизонтальное направление начерченной линии называется *положительным наклоном*.

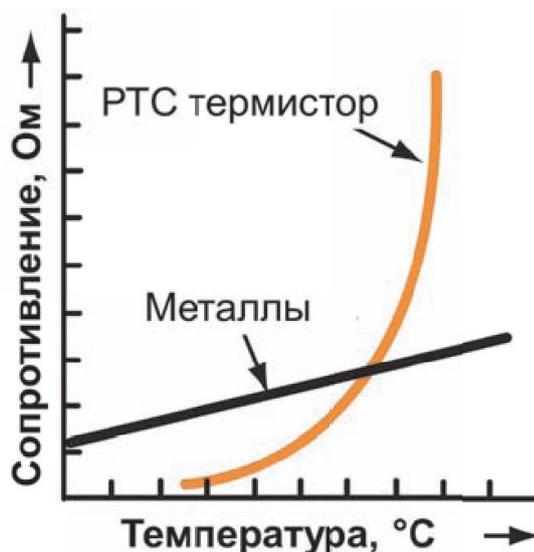


Рис. 12.43. Зависимость сопротивления от температуры

Как следует из закона Джоуля - Ленца, увеличение тока приводит к увеличению мощности или тепла, рассеиваемого проводником. Таким образом, по мере увеличения тока через проводник с положительным температурным коэффициентом сопротивление проводника будет увеличиваться. Позисторы используют это увеличение сопротивления с увеличением тока, чтобы защитить провода от перегрева.

Позистор содержит полимер (пластик), такой как полиэтилен, смешанный с углеродом или графитом. Когда температура устройства PTC ниже расчетной «точки срабатывания», устройство имеет очень

малое сопротивление, такое же, как предохранитель или автоматический прерыватель.

Протекающий через позистор ток, приводит к его нагреву. Полимер расширяется, что приводит к разделению углеродных цепей, соединяющих два терминала устройства. Сопротивление позистора увеличивается с нелинейной скоростью по мере увеличения температуры, что приводит к уменьшению тока цепи, достаточного для защиты проводов. Выходная характеристика позистора показана на рис. 12.44.

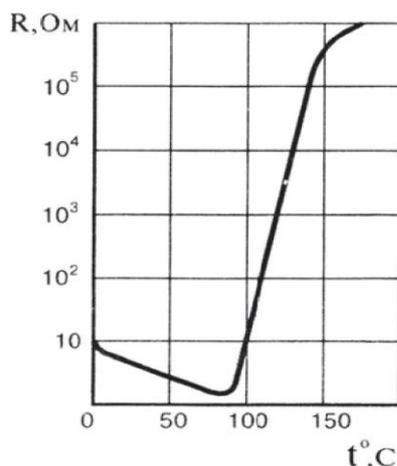


Рис. 12.44. Выходная характеристика позистора

Если состояние, вызывающее увеличение тока, будет устранено, температура позистора снизится, в результате чего сопротивление устройства вернется к исходному значению. Таким образом, позистор автоматически сбрасывается аналогично автоматическому прерывателю SAE типа II. Внешний вид современных позисторов представлен на рис. 12.45.



Рис.12.45. Внешний вид позисторов

12.5. Блок розжига газоразрядных ламп

На современных автомобилях все большее распространение получают газоразрядные ксеноновые лампы. Ксеноновые лампы — это газоразрядные источники света, в которых поток света формируется горящим в атмосфере ксенона электродуговым разрядом. Основная проблема данного типа ламп заключается в том, что для первоначального розжига дуги необходим импульс (или серия импульсов) тока с высоким напряжением — порядка 23-30 тысяч вольт (кВ), а для дальнейшего поддержания стабильного горения дуги нужно напряжение 80 В. Понятно, что от 12 и 24-вольтовой бортовой сети питать ксеноновую лампу нельзя — для этой цели и используются ЭПРА или блоки розжига. Блок розжига (балласт, электронный пускорегулирующий аппарат, ЭПРА) - компонент электрической бортовой сети транспортных средств; электронное устройство для запуска и поддержки работы газоразрядных ксеноновых дуговых ламп головного света. Внешний вид блока розжига приведен на рис. 12.46.



Рис. 12.46. Внешний вид блока-розжига ксенона

На ксеноновый блок розжига возложено три основных функции:

- розжиг электрической дуги ксеноновой лампы (запуск ламп) — преобразование постоянного тока низкого напряжения (12 или 24 В) в переменный или импульсный ток высокого напряжения (в две ступени — сначала до 500 В, затем до 23-30 кВ);
- поддержка стабильной дуги (обеспечение работы ламп в течение всего времени использования головного света) — ограничение тока до необходимого напряжения (80 В);

- общий контроль и управление ксеноновой лампой и всей электрической цепью ламп головного света.

Все современные ксеноновые блоки розжига строятся на одинаковых принципах, в них выделяются два контура:

- низковольтный - его основной является балласт, здесь действующие напряжения не превышают 80 В при работе лампы и до 500 В при розжиге;

- высоковольтный - его основной является собственно блок розжига, который часто называется стартером или игнитором, здесь действующие напряжения достигают 23-30 кВ в момент розжига.

В низковольтном контуре располагается и схема управления питанием ламп, которая начинает работать после розжига, фактически отключая высоковольтный контур. Здесь же могут предусматриваться системы защиты от коротких замыканий, перемены полярности подключения ламп, неправильной диагностики и т.д. Данные системы приводят к отключению всего блока в случае возникновения различных неисправностей или несанкционированного доступа в высоковольтный контур — это предотвращает более сложные проблемы и поражение человека током высокого напряжения.

Весь ксеноновый ЭПРА, по сути, является высоковольтным преобразователем напряжения, который обеспечивает повышение напряжения 12 или 24 В сначала примерно до 500 В, а затем до 23-30 кВ. Основу низковольтного контура этого преобразователя составляет задающий генератор на основе микросхемы, преобразующий низкое постоянное напряжение в переменное, которое затем повышается транзисторным усилителем и высоковольтным трансформатором — в результате на конденсаторе, на который нагружен трансформатор, действует переменное напряжение порядка 500 В. Далее это напряжение подается на высоковольтный контур, который так же состоит из высокочастотного трансформатора (катушки) и конденсатора — здесь напряжение вновь повышается, достигая необходимого для розжига лампы значения 23-30 кВ.

На практике возможны различные способы реализации описанных процессов, но в любом блоке розжига присутствуют генератор, транзисторный усилитель и несколько высоковольтных трансформаторов с конденсаторами высокой емкости. Схема подключения блока розжига к бортовой системе автомобиля показана на рис. 12.47.

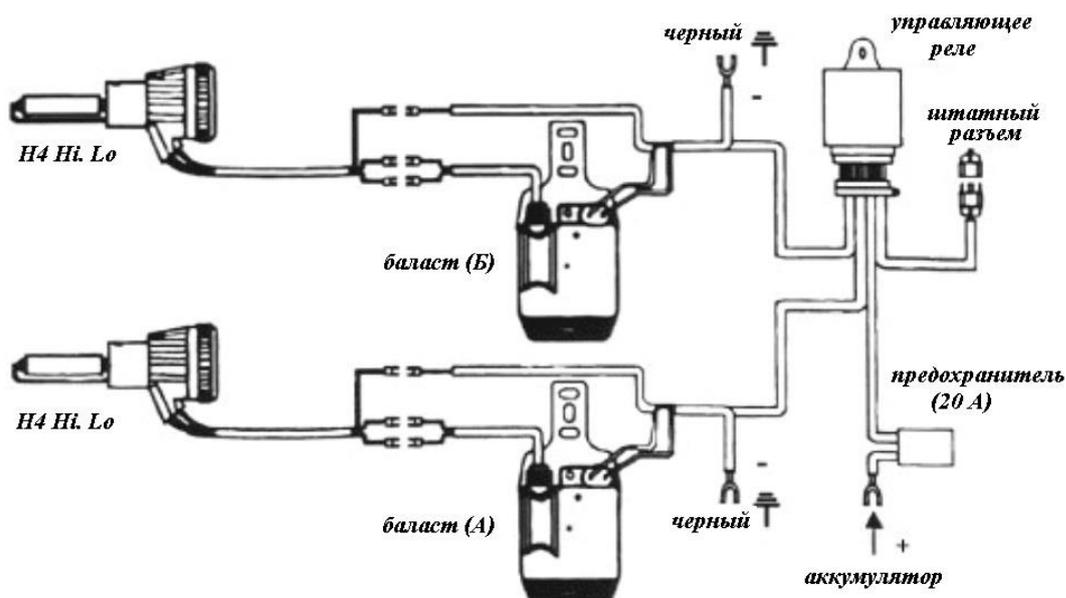


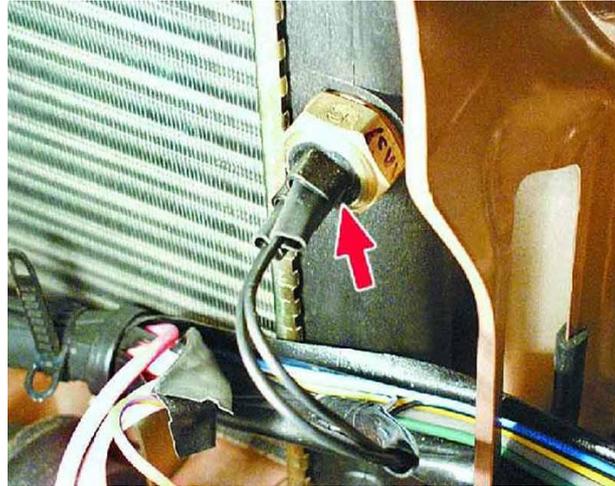
Рис. 12.47. Схема подключения блока розжига

12.6. Датчик включения вентилятора

В автомобильных системах охлаждения с электроприводом вентилятора предусматривается автоматическое включение и выключение вентилятора при изменении температуры охлаждающей жидкости с помощью специальных датчиков.

Датчик включения вентилятора - электромеханический прибор с контактной группой (группами), которая замыкает или размыкает электрическую цепь в зависимости от температуры. Датчик включается в цепь питания или управления приводом электрического вентилятора системы охлаждения двигателя, он является чувствительным элементом, который подает сигнал на включение или отключение вентилятора в зависимости от температуры охлаждающей жидкости (ОЖ). Внешний вид датчика и место его установки показаны на рис. 12.48. Датчики включения вентилятора по принципу действия делятся:

- электромеханические;
- электронные.



а)

б)

Рис. 12.48. Датчик включения вентилятора
а - внешний вид; б - место установки на радиаторе

В свою очередь, электромеханические датчики делятся на:

- с чувствительным элементом на основе рабочего тела с высоким коэффициентом расширения (воска);
- с чувствительным элементом на основе биметаллической пластины.

Благодаря конструктивным особенностям электромеханические датчики могут включаться непосредственно в цепь питания вентилятора или в цепь реле вентилятора, а электронные — в цепь управления приводом вентилятора.

Электромеханические датчики по количеству контактных групп бывают:

- односкоростные (имеют одну контактную группу, которая замыкается в определенном интервале температур);
- двухскоростные (имеют две контактных группы, которые замыкаются при разных температурах, что позволяет изменять скорость вращения вентилятора в зависимости от температуры ОЖ)

При этом контактные группы могут находиться в одном из двух состояний: нормально разомкнутые и нормально замкнутые. В первом случае вентилятор включается, когда контакты замыкаются, во втором — когда размыкаются (здесь могут использоваться дополнительные схемы управления).

Для конкретных автомобилей датчики могут отличаться температурой включения/выключения вентиляторов. В отечественных приборах предусмотрены интервалы 82–87, 87–92 и 94–99°C, в зарубежных приборах температурные интервалы лежат примерно в тех же границах, отличаясь на один-два градуса. На рис. 12.49 приведено устройство датчика включения вентилятора с наполнителем.

Это наиболее распространенный тип датчиков включения вентилятора. Основу датчика составляет емкость, заполненная нефтяным воском (церезитом, состоит в основном из парафинов) с примесью медной пудры. Емкость с воском закрыта гибкой мембраной, на которой расположен толкатель, связанный с механизмом привода подвижного контакта. Привод контакта может быть прямым (с помощью того же толкателя) или косвенным, с помощью рычага и пружины (в этом случае достигается более надежное замыкание и размыкание цепи). Все детали заключены в металлический толстостенный корпус (это обеспечивает более равномерный нагрев рабочего тела) с резьбой и электрическим разъемом.

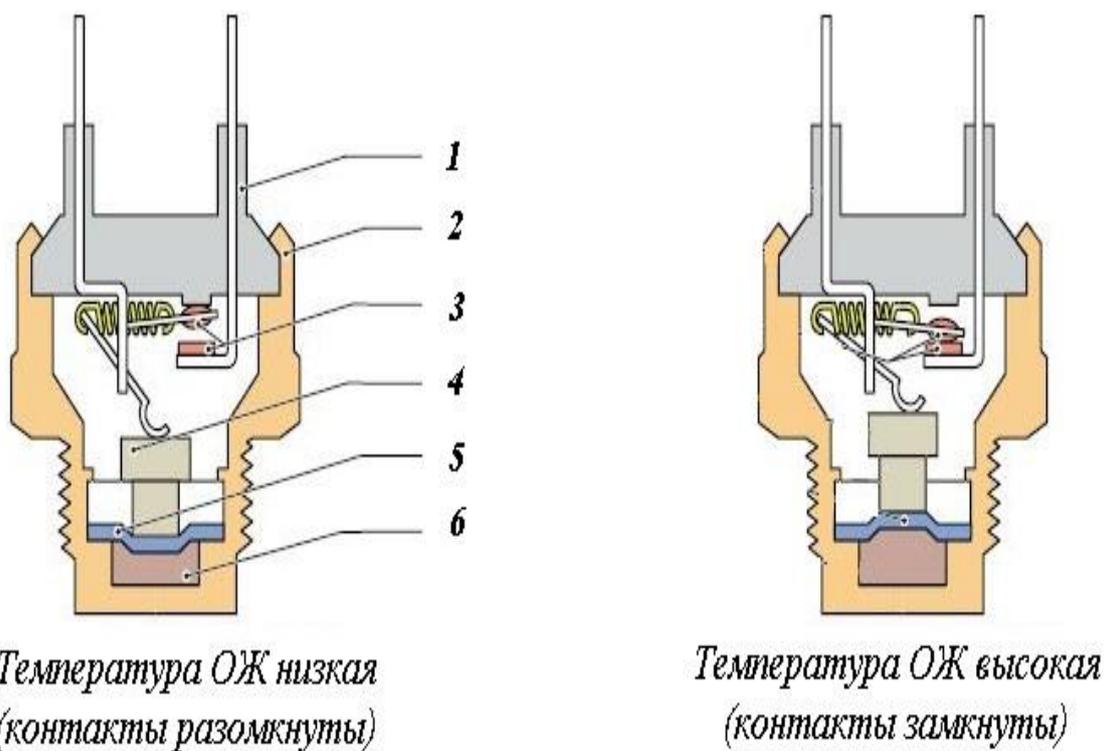


Рис. 12.49. Устройство датчика включения вентилятора с наполнителем:

- 1 – разъем; 2 – корпус; 3 – контакты; 4 – толкатель; 5 – мембрана;
6 – рабочее тело (воск)

Принцип действия такого датчика основан на эффекте изменения объема рабочего тела при изменении температуры (он же используется и в автомобильных термостатах). Воск, который играет роль рабочего тела в датчике, обладает большим коэффициентом температурного расширения, при нагреве он расширяется и вытесняется из емкости. Расширяющийся воск упирается в мембрану и заставляет ее подниматься. Та, в свою очередь, двигает толкатель и замыкает контакты - вентилятор включается. При снижении температуры мембрана опускается и происходит размыкание контактов - вентилятор выключается.

В двухскоростных подвижных контактах, которые срабатывают в различных интервалах температур.

Датчик монтируется на радиатор охлаждения (через уплотнительную прокладку), его рабочая часть непосредственно контактирует с охлаждающей жидкостью, от которой и нагревается рабочее тело (рис. 12.48 б). Обычно на автомобиле используется один датчик включения вентилятора, но сегодня можно встретить и решения с двумя однокоростными датчиками, настроенным на различную температуру.

Несколько другой принцип работы имеет датчик, представленный на рис. 12.50. Основу датчика составляет биметаллическая пластина той или иной формы, на которой расположен подвижный контакт. Также в датчике могут находиться вспомогательные компоненты для более надежного замыкания контактов. Пластина помещена в герметичный металлический корпус, на котором предусмотрена резьба и электрический разъем для подключения к системе управления вентилятором.

Принцип работы датчика основан на явлении деформации биметаллической пластины при изменении температуры. Биметаллическая пластина — это две приложенные друг к другу пластины из металлов, обладающих разным коэффициентом температурного расширения.

При росте температуры металлы расширяются по-разному, в результате биметаллическая пластина изгибается и перемещает подвижный контакт — происходит замыкание цепи (или размыкание при нормально замкнутых контактах), вентилятор включается.

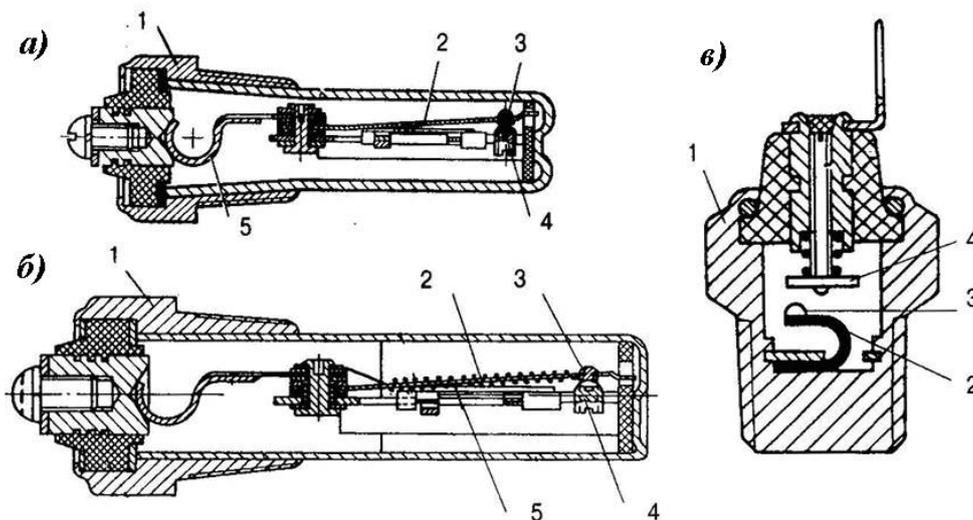


Рис. 12.50. Термобиметаллические датчики:

а – с плоским термобиметаллом; б – со спиралью; в – с фигурным термобиметаллом

1 – корпус; 2 – термобиметалл; 3 – подвижный контакт; 4 – неподвижный контакт; 5 – нагревательная спираль

Пример использования датчика включения вентилятора на автомобилях ВАЗ- 2105, 2107 приведен на рис. 12.51.

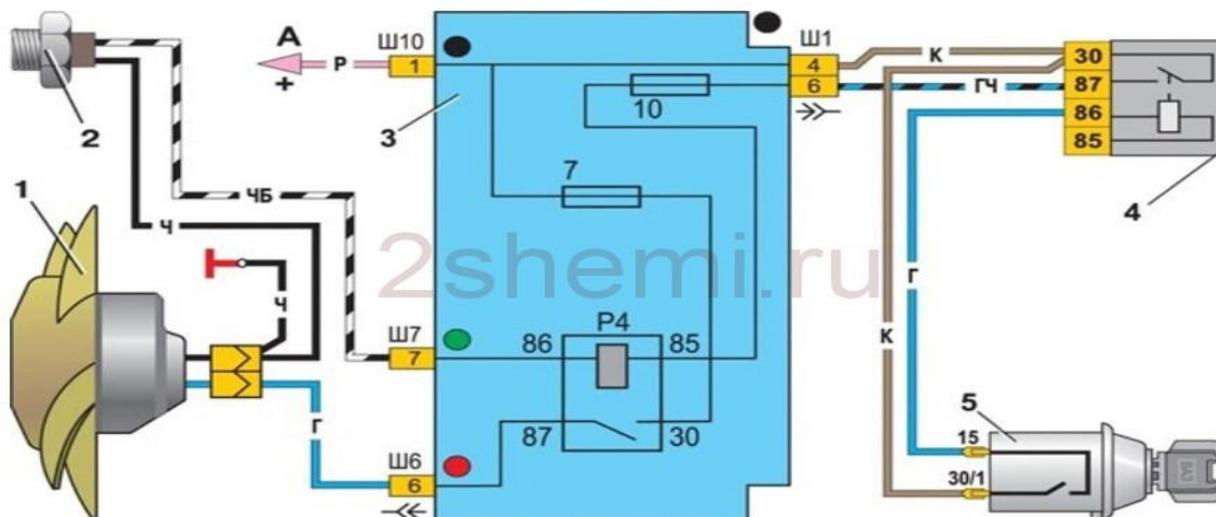


Рис. 12.51. Схема включения вентилятора охлаждения ВАЗ- 2105, 2107

1- вентилятор радиатора; 2 – датчик включения вентилятора;
3 – монтажный блок; 4 – реле зажигания; 5 – замок зажигания

В качестве электронных датчиков включения вентилятора используются штатные датчики температуры. Их основу составляет тер-

морезистор, помещенный в массивном металлическом корпусе с резьбой для вворачивания в радиатор и электрическим разъемом (рис. 12.52).

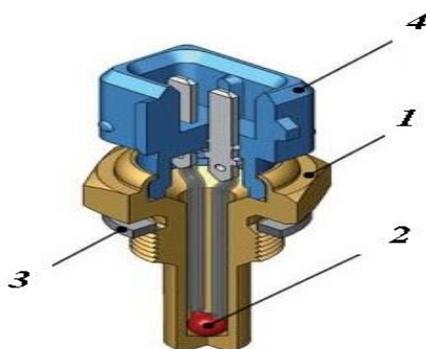


Рис. 12.52. Устройство датчика температуры с терморезистором

Принцип работы датчика основан на эффекте изменения электрического сопротивления терморезистора при изменении температуры. В зависимости от типа терморезистора, его сопротивление с ростом температуры может падать или возрастать. Изменение сопротивления терморезистора отслеживается электронной схемой, которая при достижении определенной температуры подает управляющие сигналы на включение, изменение скорости вращения или отключение вентилятора. Применение электронного датчика, в отличие от электромеханического, позволяет не просто включать и выключать вентилятор, а изменять скорость его вращения в зависимости от температуры ОЖ, обеспечивая эффективное охлаждение двигателя. Однако применение этих датчиков для управления вентиляторов возможно лишь в составе систем электронного управления.

Вопросы для самопроверки к главе 12:

1. Какие специфические требования предъявляют к электрическим аппаратам, применяемым на автомобилях?
2. Раскройте понятие выключатель, классификация выключателей.
3. Перечислите основные узлы автомобильного переключателя.
4. Опишите конструкцию замка зажигания.
5. Приведите схему включения выключателя аварийной сигнализации.

6. Опишите устройство дистанционного выключателя аккумуляторной батареи.
7. Какие функции выполняет втягивающее реле стартера?
8. Назначение втягивающей и удерживающей обмотки втягивающего реле?
9. Приведите схему подключения втягивающего реле стартера.
10. Опишите устройство электромагнитного реле.
11. Перечислите системы и устройства автомобиля, где применяются электромагнитные реле.
12. Назначение диода, установленного параллельно катушки электромагнитного реле?
13. Что называется предохранителем?
14. Перечислите основные типы предохранителей, используемых в автомобилях.
15. Какую информацию можно получить по время-токовой характеристики плавкого предохранителя?
16. Какие функции выполняет автомат-прерыватель?
17. Раскройте основной принцип, на основе которого работают термобиметаллические предохранители.
18. Что такое позисторы, как они используются в электрической системе автомобилей?
19. Назначение блок-розжига ксеноновых ламп.
20. Опишите устройство датчиков включения вентиляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложены основные сведения по теоретическим основам и устройству электрических машин и аппаратов, особенностям работы и их применению в автомобилях. Представлены практические задания по нескольким типам электрических машин с использованием компьютерного моделирования. Обучающий материал не охватывает особенностей использования электрических машин и аппаратов в различных типах и моделях автомобилей. Более подробную информацию студент может получить при самостоятельном изучении специальной литературы. Более того, использование электротехнических и электронных устройств в автомобилях развивается стремительными темпами. Приведено техническое описание практически всех электрических аппаратов, используемых в современном автомобиле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов, С. В. Электрооборудование автомобилей: учеб. для вузов / С. В. Акимов. - М: За рулём, 2005. - 384 с.
2. A. Tranter. Руководство по электрическому оборудованию автомобилей. А/О Алфамер, Хельсинки, Финляндия, 2001. ISBN 5 93392-020-7
3. Bosch. Автомобильная электрика и электроника: под редакцией Конрада Райфа; перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». - М.: ООО «Издательство «За рулём», 2014. - 616 с.
4. ГОСТ Р 52230-2004. Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия. М. 2004. 21 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу).
5. ГОСТ 17703-72. Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия. Термины и определения. М. 1987. 19 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу).
6. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины Лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: Корона-Век, 2010. - 256 с.
7. Епифанов, А.П. Электрические машины: Учебник / А.П. Епифанов, Г.А. Епифанов. - СПб.: Лань, 2017. - 300 с.
8. Защитная и коммутационная аппаратура автомобилей : учебное пособие / А. В. Пузаков. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. -132 с. : ил., табл. ISBN 978-5-9729-0342-9
9. Кацман, М.М. Электрические машины: Учебник / М.М. Кацман. - М.: Academia, 2017. - 320 с.
10. Кобзев А.А Аппараты и устройства электроавтоматики: Текст лекций / Влад. гос. ун-т. Владимир, 1997. 80 с. ISBN5-230-04794-1
11. Копылов, И.П. Электрические машины в 2 т. том 1: Учебник для академического бакалавриата / И.П. Копылов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 267 с.
12. Копылов, И.П. Электрические машины в 2 т. том 2: Учебник для академического бакалавриата / И.П. Копылов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 407 с.
13. Литвиненко, В. В. Автомобильные датчики, реле и переключатели: краткий справочник /В. В. Литвиненко, А. П. Майструк. - М: ООО «Книжное издательство «За рулём», 2008. - 176 с.
14. Москаленко, В.В. Электрические машины и приводы: Учебник / В.В. Москаленко. - М.: Академия, 2018. - 128 с.

15. Электрические и электронные аппараты : Учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению "Электротехника, электро-механика и электротехнологии" / [Розанов Юрий Константинович, Акимов Евгений Георгиевич, Ведешенков Николай Алексеевич и др.]; Под ред. Ю. К. Розанова. - 2. изд., перераб. и доп. - М. : Информэлектро, 2001. - 417 с. : ил., табл.; 26 см.; ISBN 5-7801-0151-5
16. Ютт, В. Е. Электрооборудование автомобилей. Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. И доп. – М: Горячая линия – Телеком, 2009. - 440 с. ISBN 978-5-9912-0076-9
17. Автомобильный генератор. Виды и устройство. Работа и особенности. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/avtomobilnyi-generator/> (Дата обращения 04.07.2020 г.).
18. Выключатель массы дистанционный: надежная защита АКБ от разряда [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.autoopt.ru/articles/products/5745323/> (Дата обращения 02.07.2020 г.).
19. Выключатель аварийной сигнализации: надежное управление аварийкой разряда [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.avtoall.ru/article/35032047/> (Дата обращения 02.07.2020 г.).
20. Выключатели аккумуляторных батарей автомобиля [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.xn--b1agveejs.su/avtoelektronika/226-avtomobilnye-vykluchateli-akb.html> (Дата обращения 02.07.2020 г.).
21. Преимущества и проблемы электрических приводов автомобилей [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://ustroistvo-avtomobilya.ru/bez-rubriki/preimushhestva-i-problemy-e-lektricheskikh-privodov-avtomobilej> (Дата обращения 04.07.2020 г.).
22. Устройство электроусилителя руля. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://autoleek.ru/hodovaja-chast/rulevoe-pravlenie/ustrojstvo-elektrousilitelya-rulya.html> (Дата обращения 04.07.2020 г.).
23. Электрический привод автомобиля против традиционного. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://1gai.ru/publ/513356-elektricheskij-privod-avtomobilya-protiv-tradicionnogo.html> (Дата обращения 04.07.2020 г.).
24. Электронная дроссельная заслонка. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://blamper.ru/auto/wiki/dvigatel/elektronnaya-drosselnaya-zaslonka-2907/> (Дата обращения 04.07.2020 г.).

Учебное издание

УМНОВ Владимир Павлович
ШАРАПОВ Александр Минахбетович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ:
ТЕОРИЯ, УСТРОЙСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ В АВТОМОБИЛЯХ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 07.07.20.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 17,9. Тираж 350 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.