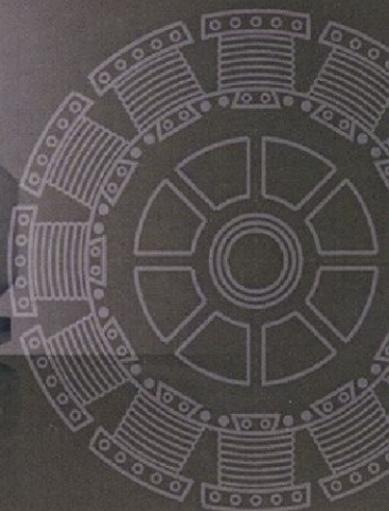


В. Н. Ванурин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ



В. Н. ВАНУРИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

РЕКОМЕНДОВАНО

УМО вузов РФ по агроинженерному образованию
в качестве учебника для студентов, осваивающих
образовательные программы бакалавриата
по направлению подготовки «Агроинженерия»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ·
МОСКВА ·
КРАСНОДАР ·
2016

ББК 31.261я73

В 17

Ванурин В. Н.

В 17 Электрические машины: Учебник. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 304 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-2015-5

Описываются конструкции и излагаются основы теории электрических машин постоянного и переменного тока, принципы действия, приводятся уравнения, а также основные характеристики электрических машин и трансформаторов. Основное внимание уделено асинхронным двигателям, наиболее распространенным в сельскохозяйственном производстве.

Учебник написан в соответствии с программой одноименного курса и предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки «Агроинженерия», «Электротехника и электротехника».

ББК 31.261я73

Рецензенты:

И. Г. СТРИЖКОВ — доктор технических наук, профессор Кубанского государственного аграрного университета;

Н. М. ПОПОВ — доктор технических наук, профессор Костромской государственной сельскохозяйственной академии.

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2016

© В. Н. Ванурин, 2016

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины являются основными элементами энергетических и электрических установок. Их появление связано с именем английского ученого М. Фарадея, который в 1821 г. первым осуществил опыт, заставив вращаться вокруг магнита проволочку, по которой проходил электрический ток. В 1831 г. им было открыто явление электромагнитной индукции и построен первый электрический генератор.

Явление электромагнитной индукции характеризуется наведением ЭДС в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, а также возникновением электромагнитной силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании по проводнику электрического тока. При движении проводника с током в магнитном поле с постоянной скоростью механическая и электромагнитная силы, действующие на проводник, уравновешены. Если при этом проводник перемещается в направлении электромагнитной силы, следовательно, против внешней механической силы, то работа, совершаемая электромагнитной силой, производится за счет энергии электромагнитного поля и покрывается источником электрической энергии. Так осуществляется преобразование электрической энергии в механическую. *Электрическая машина работает в режиме двигателя.*

Если движение проводника с током происходит в сторону, противоположную направлению электромагнитной силы, то движение может осуществляться только под

действием внешней механической силы. В этом случае работа, совершаемая механической силой, покрывается источником механической энергии. Так преобразуется механическая энергия в электрическую. *Электрическая машина работает в режиме генератора.*

Таким образом, электрической машине присуще свойство обратимости — она может работать и двигателем, и генератором.

До восьмидесятых годов XIX в. развитие электрических машин шло по пути совершенствования конструкций машин постоянного тока. В тот же период возникла необходимость передавать электроэнергию на расстоянии. В 1882 г. были проведены опыты по передаче электроэнергии на постоянном токе при повышенном напряжении. Однако высокое напряжение генераторов постоянного тока ухудшало их работу и часто приводило к авариям. Кроме того, передаче энергии на большие расстояния препятствовало повышение напряжения генераторов сверх определенного предела, которое необходимо во избежание больших потерь в линии электропередачи. Непосредственное использование электрического тока высокого напряжения в ряде случаев оказалось бы невозможным и по условиям безопасности.

Все это усиливало интерес электротехников того времени к переменному току. Стало очевидным, что без переменного тока электротехника в дальнейшем развиваться не сможет.

В 1877 г. русский ученый П. Н. Яблочков, улучшая работу изобретенных им же «свечей Яблочкова», применил переменный ток, построив установку с последовательно соединенными индукционными катушками, вторичные обмотки которых питали свечи. Индукционные катушки представляли собой по существу первый в мире трансформатор. В 1882 г. такого рода трансформатор был усовершенствован русским изобретателем И. Ф. Усагиным.

Дальнейшим этапом развития электрических машин явились работы итальянского физика Г. Феррариса и изобретателя сербского происхождения Н. Теслы по исследо-

ванию полей переменного тока, которые послужили теоретической предпосылкой для создания двухфазного асинхронного двигателя с вращающимся магнитным полем. Такой двигатель Н. Тесла создал в 1888 г. Из-за ряда недостатков двухфазный двигатель не смог найти эффективного практического применения.

Решил задачу в пользу переменного тока наш соотечественник — электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский. В 1889 г. он предложил трехфазную систему токов, построив трехфазный двигатель. Доливо-Добровольскому удалось решить основные проблемы, связанные с конструкцией двигателя. Первой демонстрацией практического применения трехфазного двигателя с вращающимся магнитным полем, а также и трехфазной системы передачи электроэнергии стала Международная электротехническая выставка 1891 г. во Франкфурте-на-Майне. Простой и надежный трехфазный двигатель послужил стимулом для развития техники переменных токов и электроэнергетики в целом.

В 1894 г. англичане — братья Д. Гопкинсон и Э. Гопкинсон предложили трансформатор с замкнутым магнитопроводом, что послужило новым толчком для развития техники переменного тока и передачи его на значительные расстояния. С этого времени начинается бурный рост использования электрической энергии в различных отраслях промышленности. Одновременно с этим стала увеличиваться установленная мощность генераторов и трансформаторов.

В настоящее время генерирование, распределение и использование электроэнергии осуществляется в основном на переменном токе, и в энергетике наиболее распространены электрические машины переменного тока.

Большая часть электроэнергии производится на тепловых электростанциях, в которых энергия сгорающего топлива довольно сложным путем преобразуется в электрическую энергию. Согласно рисунку В.1, перегретый пар высокого давления из котельного агрегата 1 по паропроводу 2 попадает на рабочие лопатки паровой турбины 3. При расширении кинетическая энергия пара превращается

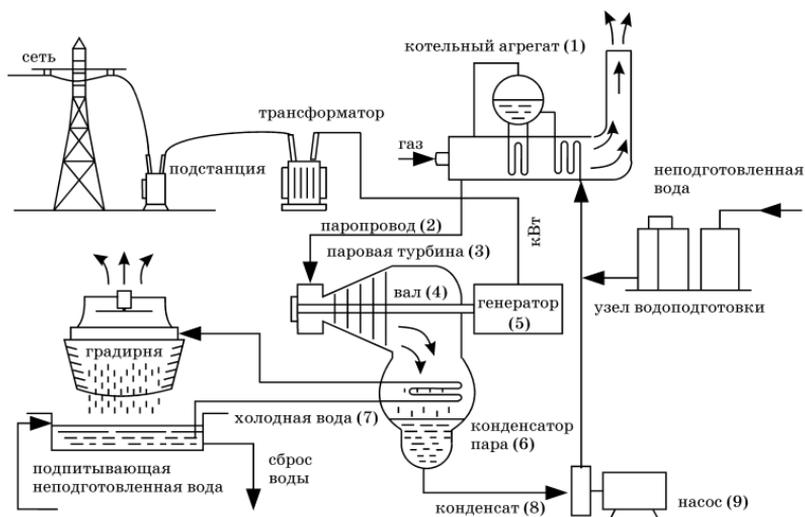


Рис. В.1
Структурная схема тепловой электростанции

в механическую энергию вращения ротора турбины, который расположен на одном валу 4 с электрогенератором 5. Отработанный пар из турбины направляется в конденсатор 6, в котором, охладившись до состояния воды путем теплообмена с циркуляционной водой 7 градирни или водохранилища, по трубопроводу 8 направляется насосом 9 обратно в котельный агрегат.

КПД преобразователя энергии — турбогенератора определяет, прежде всего, КПД паровой турбины, увеличение которого связано с повышением максимальной температуры пара. Но в турбине, испытывающей большие механические нагрузки, нельзя использовать температуру пара сверх определенного предела. Вследствие этого у лучших тепловых электростанций электрический КПД составляет не более 43–45%.

Возрастающую роль в производстве электроэнергии играют атомные электростанции (АЭС), у которых в качестве котельного агрегата служит атомный реактор с ядерными тепловыделяющими элементами. Электрический КПД атомных электростанций практически такой же, как и у обычных тепловых электростанций.

На отдельных тепловых электростанциях кроме АЭС и государственных районных электростанциях (ГРЭС) часть тепловой энергии утилизируют на теплоснабжение, что повышает КПД использования топлива.

Производство электроэнергии осуществляется также газопоршневыми (ГПЭС) и дизельными (ДЭС) электростанциями с приводом генераторов от двигателей внутреннего сгорания. Электрический КПД таких станций также не превышает 45%.

Значительная доля электроэнергии вырабатывается и на гидроэлектростанциях (рис. В.2).

Мощность гидрогенераторов, у которых ротор генератора непосредственно соединен с валом рабочего колеса гидротурбины, определяет напор и расход воды равнинных или горных рек. В отличие от тепловых электростанций, электрический КПД гидрогенераторов гидроэлектростанций достигает 94–96%.

Из других возможных методов преобразования энергии отметим магнетогидродинамический метод (МГД),

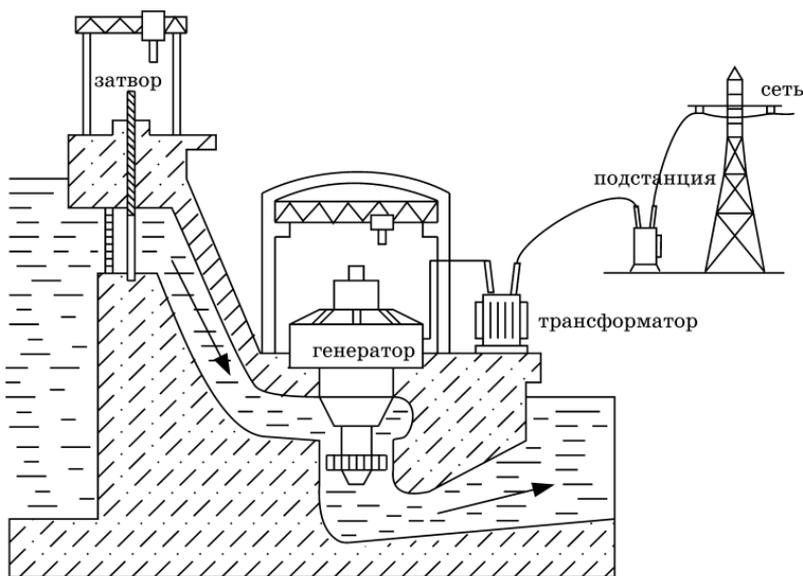


Рис. В.2
Структурная схема гидроэлектростанции

с помощью которого кинетическая энергия электропроводящего потока, ионизированного в результате сильного нагрева газа, движущегося с большой скоростью в поперечном магнитном поле, преобразуется в электрическую энергию. Установка, в которой происходит процесс преобразования энергии, называется МГД генератором. Он выполняет функции турбины и генератора. МГД метод может заметно повысить КПД тепловых станций, однако сложен в практической реализации. Прежде всего это связано с тем, что газ приобретает необходимую электропроводность только при очень высоких температурах в присутствии специальных легкоионизирующихся присадок. Вторая трудность связана с высокими требованиями к каналу, по которому протекает поток химически активных продуктов сгорания со скоростью до 1000 м/с и температурой более 2000°С.

В настоящее время усилия ученых многих стран направлены на создание прототипов реакторов для термоядерных электростанций, источниками энергии в которых служат ядра изотопов водорода. На основе термоядерных электростанций может быть решена энергетическая проблема, однако реакция термоядерного синтеза происходит лишь тогда, когда ядра сближаются на сверхмалые расстояния, преодолевая электростатическое отталкивание между собой. Практически это возможно, когда вещество нагрето до чрезвычайно высокой температуры. Кроме того, необходимо еще добиться, чтобы обладающая высокой энергией частица существовала определенное время, достаточное для взаимодействия с другими частицами. При очень высокой температуре вещество существует в виде ионизированного газа или плазмы. Таким образом, стоит задача создать плазму с возможно высокой концентрацией и возможно более длительным временем сохранения в ней быстрых частиц. Имеющиеся определенные успехи в исследованиях позволяют подойти к обоснованию и созданию экспериментальных прототипов термоядерных реакторов.

Передача электроэнергии является наиболее экономичной в случае, если она осуществляется при высоком

напряжении. По этой причине между электростанциями и потребителями происходит многократное преобразование электроэнергии с помощью повышающих и понижающих силовых трансформаторов. В зависимости от расстояния и передаваемой мощности, напряжение генераторов электростанций повышают до 110, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ. Далее на распределительных подстанциях напряжение понижают до 35, 10 или 6 кВ. Наконец, к потребителю электрическая энергия подводится напряжением 0,4 или 0,23 кВ (рис. В.3).

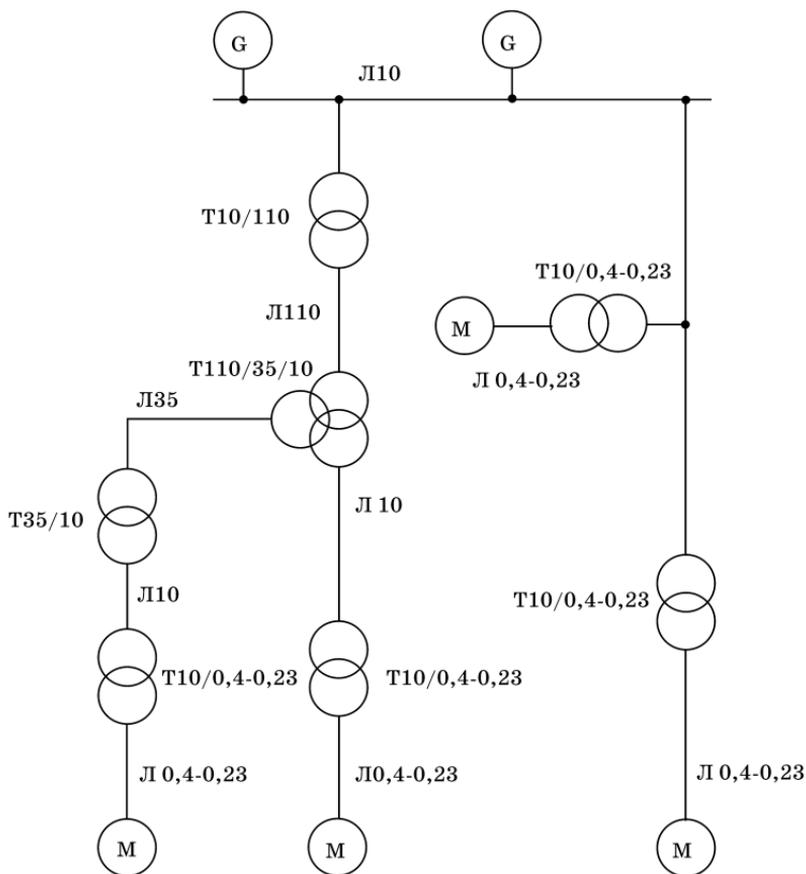


Рис. В.3
Примерная схема системы электроснабжения

Из изложенного следует, что производство электроэнергии еще в течение длительного времени будет базироваться на тепловой и гидравлической основе, а преобразователями энергии будут служить существующие типы генераторов, трансформаторов и электродвигателей.

Изучение основ теории электрических машин и трансформаторов, их устройства, принципа действия и основных характеристик составляет предмет настоящего учебника.

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений: направление подготовки «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» и «Электроэнергетика и электротехника».

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Машинной постоянного тока называют электрическую машину, в которой процесс преобразования энергии обусловлен генерированием или потреблением постоянного тока. Генераторы постоянного тока питают цепи возбуждения турбогенераторов и гидрогенераторов электростанций, служат источниками тока при выполнении сварочных работ, для зарядки аккумуляторных батарей, входят в состав автомобильного электрооборудования и т. д. Применение двигателей постоянного тока объясняется их способностью обеспечить регулирование в широком диапазоне частоты вращения, высокое значение пускового момента при небольшой кратности пускового тока, большую перегрузочную способность.

Машина постоянного тока (рис. 1.1) состоит из литой стальной станины, прикрепленных к ней главных (основных) и добавочных полюсов, якоря со щеточно-коллекторным узлом. Опорой вращающегося якоря служат подшипниковые щиты. Сердечник якоря собирают из тонких 0,35–0,5 мм штампованных листов электротехнической стали с пазами для обмотки. Сердечники полюсов собирают из листовой

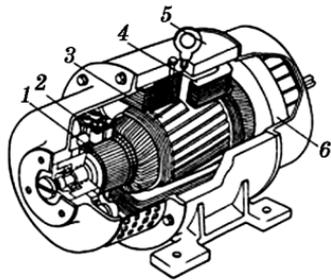


Рис. 1.1
Устройство машины
постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щеткодержатель со щетками; 3 — якорь с обмоткой в скошенных пазах; 4 — главный полюс с катушкой возбуждения; 5 — станина; 6 — вентилятор.

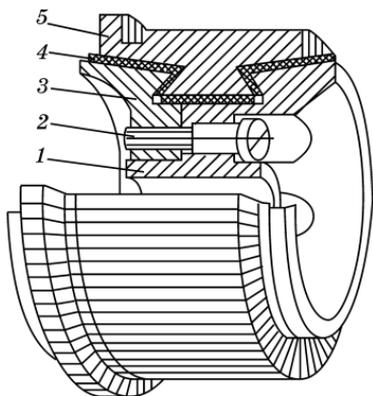


Рис. 1.2

Устройство коллектора:

1 — корпус; 2 — болт стяжной; 3 — кольцо нажимное; 4 — прокладка изоляционная; 5 — пластина коллекторная со шлицом.

стали толщиной 1–2 мм. Ток катушек возбуждения главных полюсов создает основной магнитный поток Φ . Ток катушек добавочных полюсов, расположенных по поперечной оси машины, создает поток Φ_d , способствующий безыскровой работе щеточно-коллекторного узла.

Обмотку якоря в машинах мощностью до 40 кВт выполняют из круглого медного провода, в машинах большей мощности — из прямоугольного провода. Коллектор имеет строго цилиндрическую форму и состоит из медных пластин, изолированных одна от другой термостойкими прокладками из миканита (рис. 1.2). Соединение концов катушек обмотки якоря с пластинами коллектора выполняется методом пайки в шлицах коллекторных пластин.

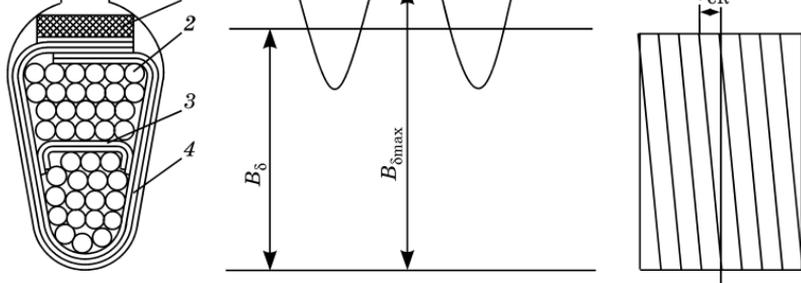


Рис. 1.3

Вид полуоткрытого паза якоря:

1 — клин из гетинакса; 2 — провод обмоточный; 3, 4 — прокладка межслоевая и пазовая изоляция из пленкостеклопласта, индукция в воздушном зазоре и скос пазов якоря.

ками главных полюсов и якорем, следовательно, и пульсации ЭДС в катушках обмотки якоря. Продольные пульсации исключают выбором нечетного соотношения зубцов якоря с числом пар полюсов машины Z/p , а заметное проявление ЭДС от поперечных пульсаций исключают скосом пазов якоря на $b_{ск} \approx \pi D_a/Z$, где D_a — диаметр якоря (рис. 1.3).

Для выявления принципа действия машины постоянного тока рассмотрим вращение катушки (секции) с w_k витками с постоянной угловой скоростью ω_2 в однородном магнитном поле (на рисунке 1.4 катушка представлена в одновитковом исполнении, коллектор — в виде двух полуколец). Если принять, что в начальный момент стороны катушки расположены на поперечной оси относительно основных полюсов, то потоко-сцепление катушки будет изменяться в зависимости от угла поворота $\alpha = \omega_2 t$ по закону $\psi_\alpha = w_k \Phi \cos \alpha = w_k \Phi \cos \omega_2 t$. В машине на p пар полюсов круговая частота электромагнитных колебаний ω связана с угловой скоростью якоря ω_2 соотношением $\omega = \omega_2 p$. Поэтому в общем виде:

$$\psi_\alpha = w_k \Phi \cos \omega_2 p t = w_k \Phi \cos \omega t.$$

В катушке наводится ЭДС

$$e_k = - \frac{d\psi_\alpha}{dt} = w_k \Phi \omega \sin \omega t = w_k \Phi \omega_2 p \sin \omega t = E_{km} \sin \omega t,$$

где $E_{km} = w_k \Phi \omega_2 p$ — амплитуда ЭДС катушки.

Направление ЭДС в сторонах катушки определяют по известному правилу правой руки. Выпрямление ЭДС осуществляется с помощью коллектора и щеток.

При прохождении сторон катушек поперечной оси каждая из сторон попадает в зону действия другого полюса, и ЭДС в сторонах катушек изменит знак. В это же

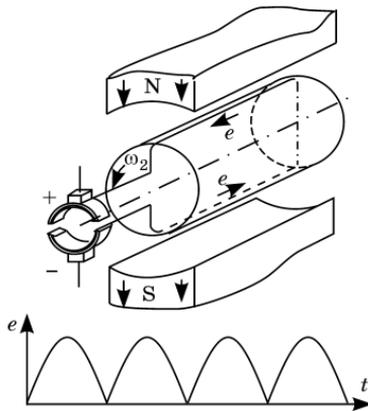


Рис. 1.4
Вид генерируемой ЭДС катушки

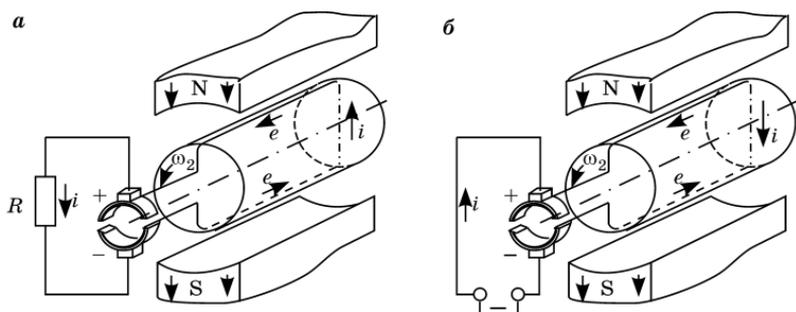


Рис. 1.5
Принципиальные схемы генератора (а) и двигателя (б)

самое время каждое полукольцо условного коллектора покидает щетку, с которой оно соприкасалось до подхода сторон катушки к поперечной оси, и начинает соприкасаться с другой щеткой. Таким образом, знак ЭДС на щетках не изменится. Щетки замыкают катушку в тот момент, когда ЭДС в ней имеет практически нулевое значение.

При включении на щетки нагрузки в цепи потечет выпрямленный ток, направление которого совпадает с направлением ЭДС (рис. 1.5а). Используя известное правило левой руки, можно определить направление электромагнитных сил, действующих на проводники катушки с током. Эти силы всегда направлены навстречу действию внешних сил, приводящих катушку во вращение. *Так принципиально работает машина постоянного тока в режиме генератора.*

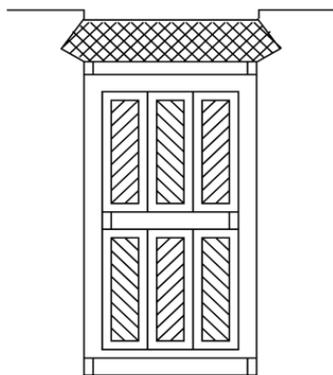


Рис. 1.6
Элементарные пазы якоря

Если при том же направлении потока Φ и прежней маркировке щеток к неподвижной катушке подвести напряжение от внешней сети (рис. 1.5б), то под действием электромагнитных сил катушка придет во вращение. Направление вращения и направление наведенной в катушке ЭДС останутся такими же, как и при работе машины в

качестве генератора. Так принципиально работает машина постоянного тока в режиме двигателя.

Заметную пульсацию ЭДС якоря от основного потока исключают большим числом катушек S якорной обмотки, которое всегда равно числу коллекторных пластин K и числу элементарных пазов Z_3 якоря, $S = Z_3 = K$. Образование элементарных пазов (рис. 1.6, в пазу три элементарных паза) объясняется невозможностью по условиям механической прочности зубцов штамповать в сердечнике якоря большое число реальных пазов.

1.2. ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Обмотки якоря по виду и по способу соединения катушек делятся на петлевые, волновые и комбинированные обмотки.

У простой петлевой обмотки на число полюсов $2p$ концы каждой катушки припаяны к двум рядом лежащим коллекторным пластинам (рис. 1.7, 1.8).

Первый частичный шаг y_1 — расстояние между сторонами катушки в элементарных пазах равен полюсному делению $y_1 = \tau = Z_3/2p$. Если $Z_3/2p$ не целое число, то шаг

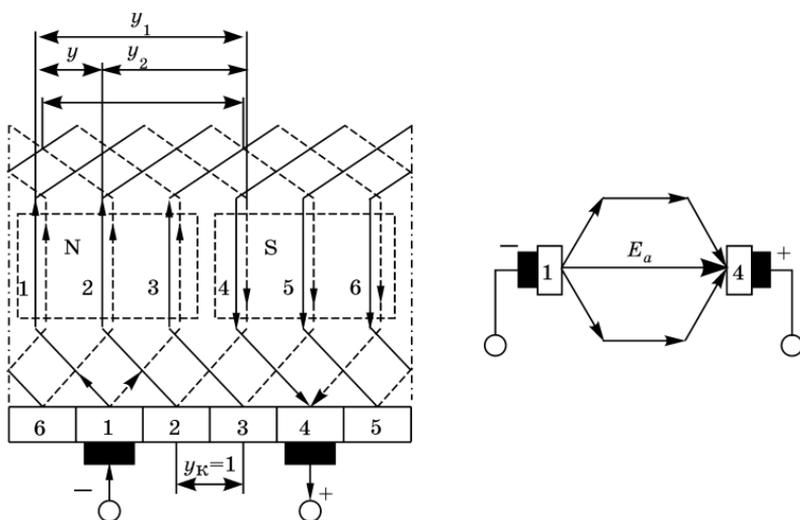


Рис. 1.7
Схема двухполюсной простой петлевой обмотки

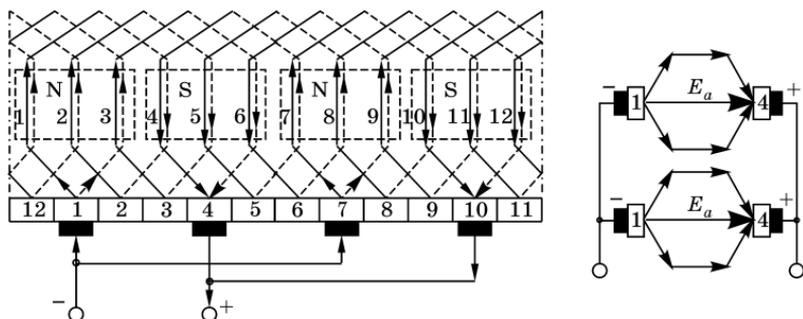


Рис. 1.8
Схема четырехполюсной простой петлевой обмотки

округляется до ближайшего целого числа. Результирующий шаг y представляет расстояние между одноименными сторонами двух следующих друг за другом катушек. Вторым частичным шагом y_2 называют расстояние между правой стороной катушки и левой стороной следующей по схеме катушки $y_2 = y_1 - y$. Шаг по коллектору $y_k = y = 1$.

Щетками обмотка якоря делится на параллельные ветви. Число параллельных ветвей простой петлевой обмотки $2a = 2p$. Щетки накладываются на коллекторные пластины, в которых наблюдается расхождение и схождение ЭДС параллельных ветвей. Только в этом случае ЭДС якоря, представляющая собой геометрическую сумму амплитуд ЭДС E_{km} всех катушек, входящих в параллельную ветвь, будет наибольшей. При таком расположении щетки периодически замыкают накоротко катушки, стороны которых лежат в зонах с ЭДС практически равной нулю.

При вращении якоря катушки относительно неподвижных щеток поочередно переходят из одной параллельной ветви в другую, однако положение начал и концов параллельных ветвей обмотки относительно щеток при этом не изменяется. На схемах щетки показываются расположенными на поперечной оси машины, подчеркивая тем самым, что щетки наложены на коллекторные пластины, к которым припаяны катушки, стороны которых расположены на поперечной оси.

Чем больше катушек параллельной ветви, тем больше многоугольник ЭДС со сторонами $E_{км}$ приближается к окружности и тем незаметнее становится пульсация ЭДС якоря от E_{amax} до E_{amin} (рис. 1.9). При достаточно большом количестве катушек n параллельной ветви, когда арифметическая сумма амплитуд ЭДС катушек близка к полуокружности ($nE_{км} = \pi R$), а их геометрическая сумма близка к диаметру окружности ($E_a = 2R$), пульсация ЭДС якоря становится практически незаметной. Отношение

$$\frac{E_a}{nE_{км}} = \frac{2R}{\pi R} = \frac{2}{\pi} = k_p$$

является коэффициентом распределения n катушек или близком к нему, и обмоточным коэффициентом $k_{оба}$ якорной обмотки ЭДС якоря

$$E_a = nE_{км}k_{оба} = n\Phi\omega_k k_{оба}\omega_2 p = c\Phi\omega_2,$$

где $c = n\omega_k k_{оба} p$ — конструктивная постоянная машины.

Электромагнитный момент, развиваемый якорем,

$$M_{эм} = \frac{E_a I_a}{\omega_2} = \frac{c\Phi\omega_2 I_a}{\omega_2} = c\Phi I_a,$$

где I_a — ток якоря.

Сложная петлевая обмотка состоит из m простых петлевых обмоток. Между двумя катушками каждой простой обмотки должно быть предусмотрено место для $(m - 1)$ катушек других простых обмоток (см. рис. 1.10). Результирующий шаг и шаг по коллектору сложной обмотки $y = y_k = m$. Другие шаги $y_1 = Z_p/2p$ и $y_2 = y_1 - y$. Число параллельных ветвей сложной петлевой обмотки $2a = 2p m$.

В простых петлевых обмотках каждая пара параллельных ветвей находится под отдельной парой полюсов. Если

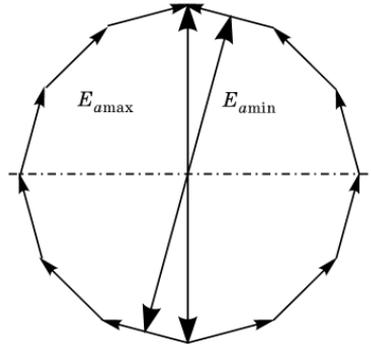


Рис. 1.9
Пульсация ЭДС

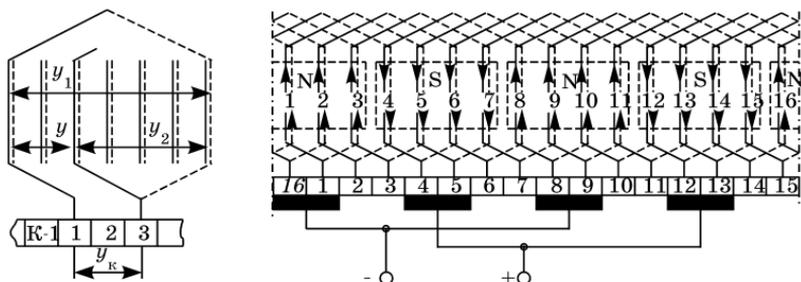


Рис. 1.10
Формирование сложной петлевой обмотки и схема обмотки

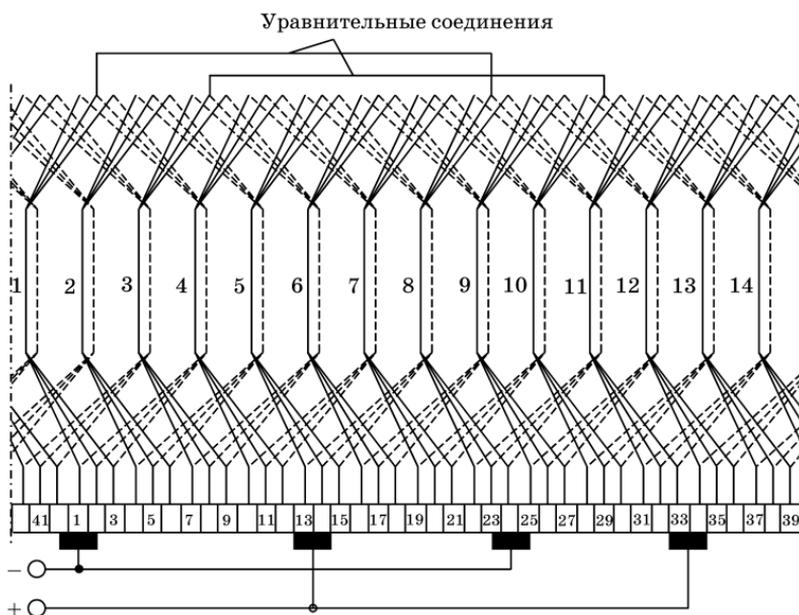


Рис. 1.11
Схема простой петлевой обмотки (в пазу три элементарных паза)

по каким-либо причинам (неравномерность воздушного зазора под полюсами, раковины в станине и т. п.) магнитный поток одной пары полюсов не будет равен магнитному потоку другой пары полюсов, то в параллельных ветвях будут неодинаковые ЭДС, в результате чего появятся уравнительные токи, которые замыкаются через щетки, ухудшая их работу. При наличии уравнителей, которые

в простых петлевых обмотках называют *уравнителями первого рода*, уравнительные токи замыкаются по уравнителям, минуя щетки. Уравнители соединяют точки теоретически равного потенциала. Шаг уравнительных соединений равен двойному полюсному делению, а число уравнителей равно числу пар полюсов p (рис. 1.11) (в отличие от показанного на рисунке, уравнители выполняют под лобовыми частями обмотки со стороны коллектора).

Простая волновая обмотка получается последовательным соединением катушек, расположенных под разными парами полюсов якоря. За каждый обход укладывается p катушек (рис. 1.12). Каждый следующий обход

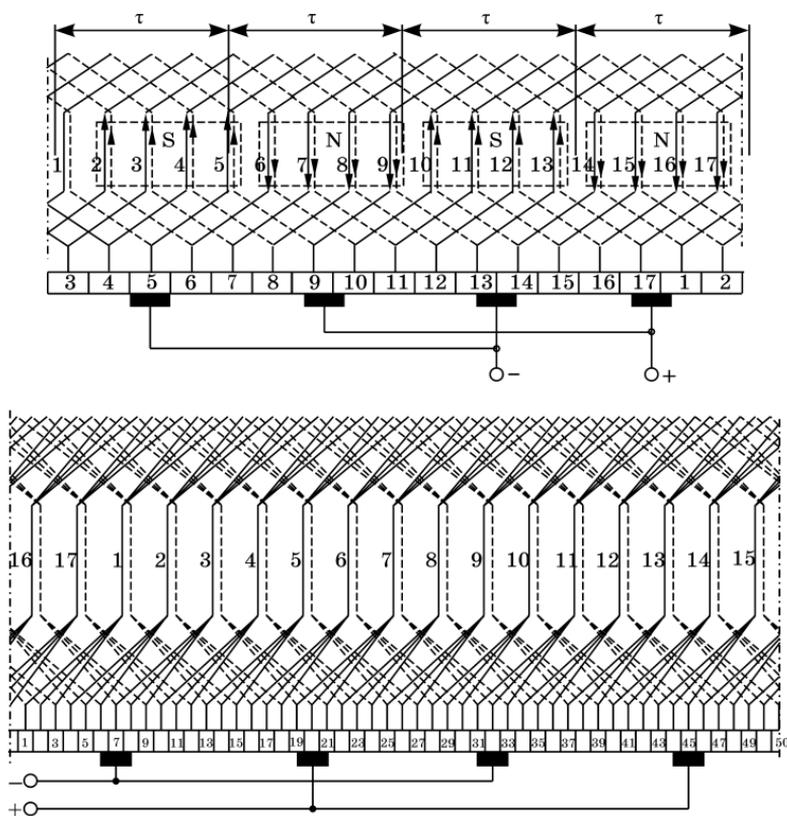


Рис. 1.12

Схемы простых волновых четырехполюсных обмоток

начинается с коллекторной пластины, расположенной рядом с исходной пластиной предыдущего обхода. В соответствии с этим шаг по коллектору и результирующий шаг $y_k = y = (K + 1)/p$. Первый частичный шаг $y_1 = Z_s/2p$. Второй частичный шаг $y_2 = y - y_1$. Поскольку цепь простой волновой обмотки за один обход по якору проходит все полюсные деления, то число параллельных ветвей обмотки всегда $2a = 2$. В простых волновых обмотках катушки параллельных ветвей обмотки последовательно располагаются под всеми полюсами машины, следовательно, уравнительные соединения в них не нужны.

Сложная волновая обмотка состоит из m простых волновых обмоток (рис. 1.13). Для нее число параллельных ветвей $2a = 2m$. Шаги $y_1 = Z_s/2p$, $y = y_k = (K + m)/p$, $y_2 = y - y_1$.

Сложные обмотки могут быть однократно или многократно замкнутыми. В последнем случае простые обмотки не имеют между собой электрических связей помимо щеток, т. е. каждая простая обмотка замкнута сама на себя. В сложных обмотках ширина щеток должна иметь не менее m коллекторных делений.

В сложных петлевых и волновых обмотках применяют *уравниватели второго рода*, которые соединяют между собой точки простых обмоток теоретически равного потенциала.

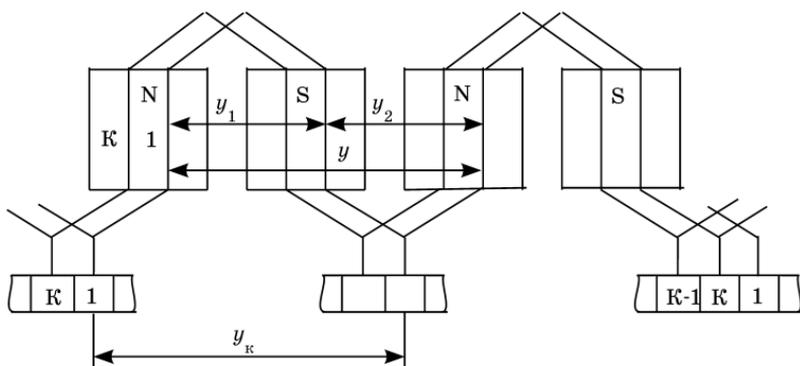


Рис. 1.13
К формированию схемы сложной волновой обмотки

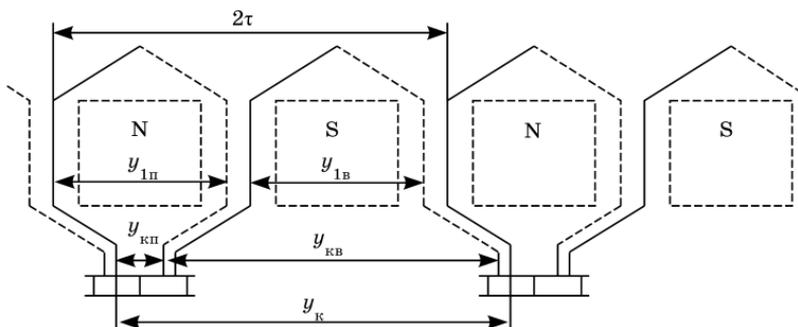


Рис. 1.14

К формированию схемы комбинированной обмотки

Комбинированная обмотка представляет собой совокупность простой петлевой обмотки и сложной волновой обмотки, которые укладываются в одних и тех же пазах якоря в четыре слоя и присоединяются к одним и тем же пластинам коллектора (рис. 1.14). Обе обмотки состоят из одинакового числа катушек. Каждая из них служит для проведения половины общего тока якоря. В связи с этим число параллельных ветвей простой петлевой обмотки $2a = 2p$ должно быть одинаковым с числом параллельных ветвей сложной волновой обмотки $2a = 2m$, а всего комбинированная обмотка имеет число параллельных ветвей $2a = 4p$.

В комбинированных обмотках катушки волновой обмотки соединяют между собой практически равнопотенциальные точки простой петлевой обмотки и выполняют роль уравнивателей первого рода. Секции простой петлевой обмотки соединяют между собой практически равнопотенциальные точки двух простых волновых обмоток, поэтому они являются уравнивателями второго рода. В этом состоит достоинство комбинированных обмоток.

1.3. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основной поток Φ совместно с не участвующим в наведении ЭДС в обмотке якоря потоком рассеяния Φ_{σ} (см. рис. 1.15) определяет отношение МДС главных полюсов $F_B = I_B w_B$ (w_B — число витков катушек на пару полюсов;

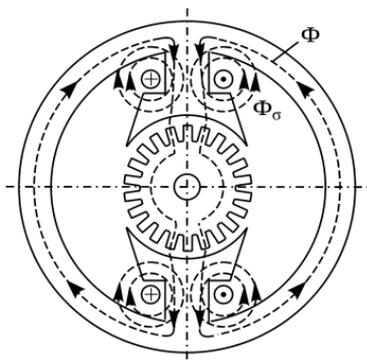


Рис. 1.15
Представление основного
потока и потока рассеяния

I_B — ток возбуждения) к сумме магнитных сопротивлений R_m всех участков магнитной цепи:

$$\Phi + \Phi_{\sigma} = F_2 / \sum R_m.$$

МДС, необходимая для создания основного потока, определяется из расчета магнитной цепи машины, включающей воздушный зазор δ , зубцы якоря h_z , спинку якоря L_a , полюсы h_{Π} , ядро (станину) $L_{\text{я}}$ (рис. 1.16). Прини-

мая, что в каждом участке напряженность магнитного поля постоянна, получим (при расчете МДС полюса и ядра учитывают и поток рассеяния $\Phi_{\sigma} \approx 0,1\Phi$):

$$\begin{aligned} 2H_{\delta}\delta + 2H_z h_z + H_a L_a + 2H_{\Pi} h_{\Pi} + H_{\text{я}} L_{\text{я}} = \\ = F_{\delta} + F_z + F_a + F_{\Pi} + F_{\text{я}} = F_B. \end{aligned}$$

Для построения характеристики $\Phi = f(F)$ берут несколько значений потока Φ и для каждого рассчитывают МДС F . При проектировании машины сечения участков

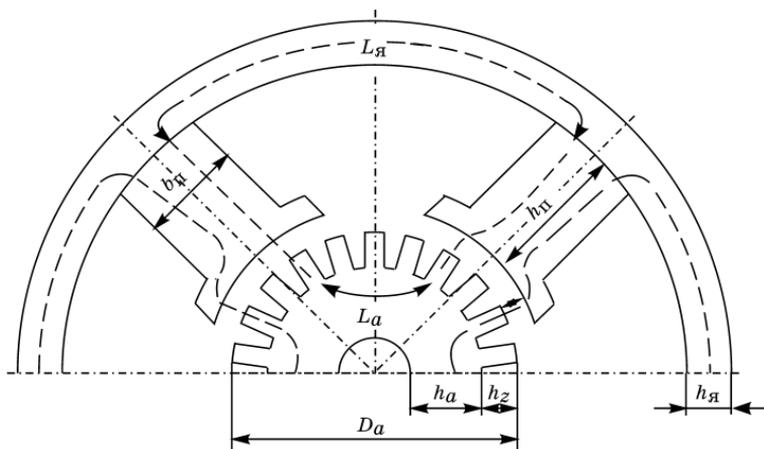


Рис. 1.16
Магнитная цепь четырехполюсной машины

магнитной цепи выбираются таким образом, чтобы при номинальном режиме значения индукции находились в таких пределах: 1,0–1,5 — в сердечнике якоря; 1,8–2,5 — в зубцах якоря в наименьшем сечении; 1,2–1,6 — в полюсе; 1,1–1,2 — в ярме (стане); 0,5–1,0 — в воздушном зазоре.

Действительное распределение индукции в воздушном зазоре в виде криволинейной трапеции заменяют прямоугольным, предполагая индукцию неизменной на некоторой теоретической дуге $b_\delta = \alpha_\delta \tau$, где $\alpha_\delta = 0,7-0,85$ — коэффициент полюсной дуги.

Из-за зубцов якоря длина магнитной линии в зазоре больше расстояния δ , так как магнитные линии в зазоре искривлены. Это обстоятельство учитывается введением коэффициента воздушного зазора k_δ — коэффициента Картера. Как правило, $k_\delta = 1,2-1,35$.

При определенной величине потока Φ индукция и напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, а также МДС, приходящаяся на воздушный зазор:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S_\delta} = \frac{\Phi}{l_\delta \cdot b_\delta}; \quad H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}; \quad F_\delta = H_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta = \frac{k_\delta \cdot \delta \cdot B_\delta}{\mu_0},$$

где $l_\delta = (l_a + l_n)/2$ — расчетная длина (l_a — длина якоря, l_n — длина полюса); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная.

На остальных участках x магнитной цепи сечением S_x , выполненных из стали, индукция $B_x = \Phi_x/S_x$. По справочным кривым намагничивания для марки стали участков определяют напряженность магнитного поля H_x . МДС каждого из участков $F_x = H_x l_x$.

По полученным данным строят зависимость $\Phi = f(F_B)$. Машины постоянного тока изготавливаются с умеренным насыщением магнитной цепи. Степень насыщения для но-

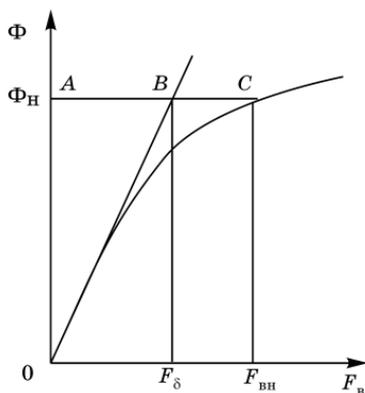


Рис. 1.17
Магнитная характеристика машины

минального потока Φ_n характеризуется коэффициентом насыщения (см. рис. 1.17):

$$k_\mu = \frac{F_{\text{вн}}}{F_\delta} = 1 + \frac{F_{\text{zn}} + F_{\text{ан}} + F_{\text{лн}} + F_{\text{сн}}}{F_\delta} = 1 + \frac{BC}{AB}.$$

Как правило, для машин постоянного тока $k_\mu = 1,4-1,75$.

1.4. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Основной магнитный поток в машине постоянного тока образует МДС тока катушек главных полюсов. При нагрузке МДС тока обмотки якоря образует свой магнитный поток, который оказывает определенное влияние на поток главных полюсов. Это влияние называется *реакцией якоря*, а поток обмотки якоря называют потоком реакции якоря.

При анализе реакции якоря используют метод, в соответствии с которым строят отдельно картину потока от МДС главных полюсов и отдельно картину потока от МДС якоря, а затем совмещают их в картину результирующего потока. Развернув магнитную цепь, например двухполюсной машины (рис. 1.18), примем, что в междупольсном пространстве в условных больших пазах лежат стороны катушек с $2w_v$ витками с током возбуждения I_v , где w_v — число витков катушки обмотки возбуждения. Обмотка якоря равномерно распределена по элементарным пазам, а катушка этой обмотки включает w_k витков с током параллельной ветви $i_a = I_a/2a$.

Принимая воздушный зазор под полюсами постоянным ($\delta = \text{const}$), а также учитывая, что магнитная проницаемость стали значительно превосходит магнитную проницаемость воздуха ($\mu_{\text{ст}} \gg \mu_v$), ступенчатую МДС обмотки якоря на рисунке 1.18 представим прямыми линиями (ось $O-O$ — поперечная ось или ось q машины).

Физическая нейтраль результирующего потока (и индукции) смещается относительно поперечной оси (геометрической нейтрали) якоря на угол β . В генераторе физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а в двигателе она смещается против вращения якоря, поскольку при одинаковом направлении вращения ток

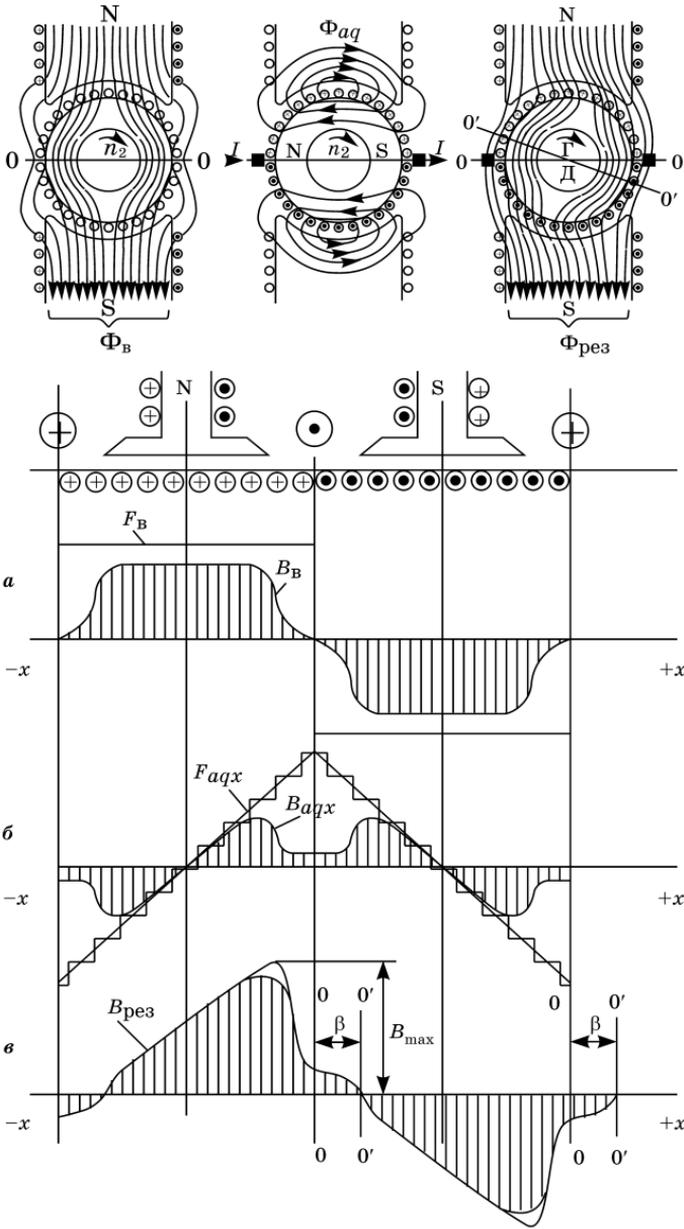


Рис. 1.18

Картина МДС и магнитного поля обмотки возбуждения (а), обмотки якоря (б), вид результирующего магнитного поля (в)

в якоре генератора и двигателя имеет противоположные направления.

Реакция якоря оказывает неблагоприятное влияние на работу машины постоянного тока. Во-первых, щетки при их расположении на поперечной оси будут замыкать накоротко катушки, ЭДС которых отличается от нулевого значения. В этих катушках образуются токи, ограниченные только внутренними сопротивлениями самих катушек. Эти токи можно назвать токами короткого замыкания катушек. При вращении якоря такое периодическое замыкание и размыкание катушек приводит к разрыву токов, что проявляется в искрении под щетками.

Реакция якоря является также причиной некоторого уменьшения результирующего потока в машине при насыщенной магнитной цепи. Действительно, ввиду свойственной для всех насыщенных машин нелинейности магнитной характеристики увеличение потока на одном краю полюса ($+\Delta\Phi$) под действием МДС якоря ($+\Delta F_a$) неравнозначно уменьшению потока на другом краю полюса ($-\Delta\Phi$) от действия МДС обратного знака такой же величины ($-\Delta F_a$) (рис. 1.19). Уменьшение результирующего потока по сравнению с потоком главных полюсов невелико, однако оказывает влияние на уменьшение ЭДС якоря. Если машина работает при небольших токах возбуждения, т. е. на прямолинейной части магнитной характеристики, то реакция якоря практически не оказывает размагничивающего действия.

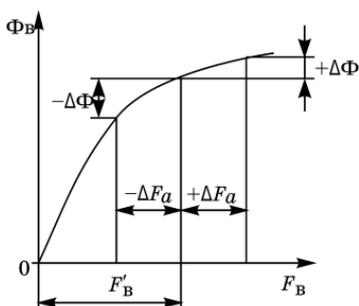


Рис. 1.19

Характер изменения потока

Другой существенный недостаток, вызванный реакцией якоря, это возможность образования в машине кругового огня из-за пиков индукции результирующего магнитного поля под краями полюсов. Круговой огонь представляет собой электрическую дугу, замыкающую накоротко щеткодержатели разной полярности, которая может привести к оп-

лавлению коллектора и выходу машины из строя. Причина возникновения кругового огня заключается в образовании дуги между смежными коллекторными пластинами из-за замыкания их щеточной пылью.

Вероятность возникновения кругового огня по коллектору возрастает с увеличением максимального значения напряжения между смежными коллекторными пластинами. Для того чтобы не возник круговой огонь, ограничивают максимальное значение напряжения между смежными коллекторными пластинами для машин большой мощности 40 В, а для машин малой мощности 70 В.

Для предотвращения появления кругового огня принимают и другие меры. Так, главным полюсам придают такое очертание, чтобы по мере приближения к их краям индукция уменьшалась. Иногда в машинах ограничивают длину якоря. В машинах большой мощности, работающих в тяжелых условиях (частые перегрузки и т. д.), на полюсах машины устраивают компенсационную обмотку, которую включают последовательно с обмоткой якоря. Ее МДС компенсирует МДС реакции якоря.

1.5. ПРОЦЕСС КОММУТАЦИИ

Под коммутацией при работе коллекторных машин понимают физический процесс, протекающий под щетками и проявляющийся в искрении. Искрение может быть по механическим причинам, когда из-за шероховатости коллектора или наличия выступающих изоляционных прокладок происходит кратковременный разрыв контакта между щеткой и коллектором, и по электромагнитным причинам, когда оно вызвано реактивной ЭДС вследствие быстро меняющегося тока в катушках якорной обмотки при переключении их из одной параллельной ветви в другую. Обычно анализируют электромагнитные причины, так как механические причины могут быть легко обнаружены и устранены.

На рисунке 1.20 показана часть простой петлевой обмотки в различные моменты времени вращения якоря. Для упрощения анализа коммутации примем, что ширина щетки $b_{щ}$ равна ширине коллекторного деления $b_{к}$. При перемещении коллектора относительно щетки на одно

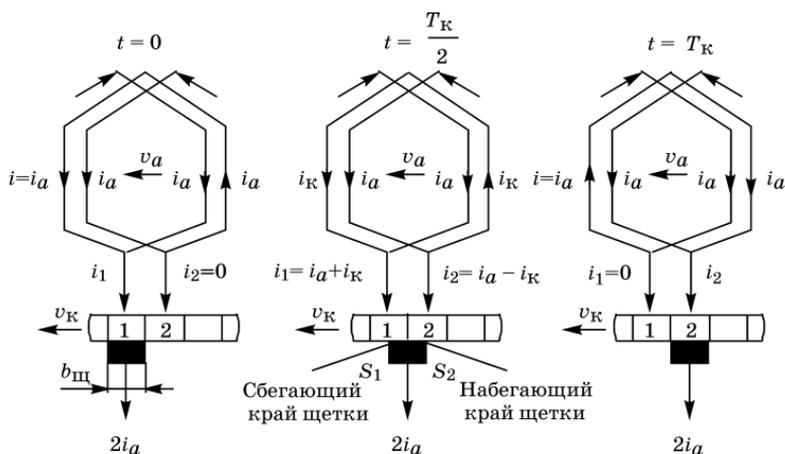


Рис. 1.20

Изменение тока в катушке за период коммутации

коллекторное деление ток в катушке изменяет направление. При линейной скорости вращения коллектора v_K процесс переключения катушек обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую периодический и протекает за время $T_K = b_{щ}/v_K$, называемое *периодом коммутации*.

Линейная скорость вращения коллектора диаметром D_K с числом пластин K при частоте вращения коллектора n_2 (об/мин) и соответственно период коммутации:

$$v_K = \frac{\pi D_K n_2}{60} = \frac{K b_K n_2}{60};$$

$$T_K = \frac{b_{щ} \cdot 60}{b_K K n_2}.$$

В машинах постоянного тока $T_K = 0,001-0,0001$ с, т. е. частота коммутации достигает порядка $f_K = 1000-10\,000$ Гц. С такой же частотой изменяется и ток в коммутируемых катушках i_K . Такое быстрое изменение тока в катушках приводит к появлению в каждой из них поочередно реактивной ЭДС самоиндукции:

$$e_p = -L_K \frac{di_K}{dt},$$

где L_K — индуктивность катушки.

Если принять, что при прохождении по катушке тока i_k образуется поток Φ_k и он пронизывает все витки катушки, то

$$L_k = \Psi_k / i_k = w_k^2 / R_\mu,$$

где R_μ — магнитное сопротивление потоку Φ_k , который замыкается вокруг катушки w_k с витками. Этот поток можно причислить к потоку рассеяния короткозамкнутой катушки якоря.

При выбранном направлении тока i_k для коммутируемой катушки

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 + i_k R_k = e_p \pm e_k,$$

где i_1, i_2 — токи сбегающего и набегающего края щетки; R_1, R_2 — сопротивления переходного контакта сбегающего и набегающего края щетки с пластиной коллектора; R_k — сопротивление катушки; e_k — ЭДС вращения в катушке от внешнего магнитного поля в месте расположения катушки (знак ЭДС определяет направление магнитного поля).

Предположим, что с помощью какого-либо внешнего магнитного поля в зоне коммутации удалось добиться того, чтобы $e_p \pm e_k = 0$, т. е. $e_p = \pm e_k$. Тогда для коммутируемой катушки

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 + i_k R_k = 0$$

или, учитывая, что $i_1 = i_a + i_k$ и $i_2 = i_a - i_k$,

$$i_k R_k + (i_a + i_k) R_1 = (i_a - i_k) R_2,$$

откуда

$$i_k = i_a \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1 + R_k}.$$

Для дальнейшего анализа электромагнитных причин коммутационного искрения щеток сделаем следующие допущения: вся прилегающая к коллектору поверхность щетки равномерно проводит ток; удельное переходное сопротивление контакта щетка — коллектор не зависит от плотности тока и размеров контактной поверхности.

В этом случае контактные площади пластин на сбегавшем и набегающем крае щетки:

$$S_1 = S_{щ} \frac{T_k - t}{T_k};$$

$$S_2 = S_{щ} \frac{t}{T_k},$$

где $S_{щ}$ — полная контактная площадь коллекторной пластины со щеткой; $R_{щ}$ — переходное контактное сопротивление щетки.

Таким образом, характер изменения тока в коммутированной катушке имеет вид:

$$i_k = i_a \frac{1 - \frac{2t}{T_k}}{1 - \frac{R_k}{R_l} \cdot \frac{t}{T_k} \left(1 - \frac{t}{T_k}\right)}.$$

Ток в коммутируемой катушке в общем случае — нелинейная функция времени, причем нелинейность обусловлена сопротивлениями R_k и $R_{щ}$.

В машинах постоянного тока применяют щетки:

- электрографитированные марок ЭГ2А, ЭГ4, ЭГ8, ЭГ14 и др. — в генераторах постоянного тока автотракторного электрооборудования и в машинах с тяжелыми условиями коммутации;
- угольнографитные марок Г3, Г20, Г21, Г21А, Г33 и др. — в машинах нормального исполнения;
- меднографитные марок МГ, МГ4, МГС5, МГС2 и др. — в низковольтных машинах с высокой плотностью тока, в стартерах.

Большая часть щеток характеризуется большим переходным контактным сопротивлением, позволяющим пренебречь отношением $R_k/R_{щ}$. В этом случае изменение тока в коммутируемой катушке

$$i_k = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k}\right)$$

становится прямолинейным (рис. 1.21), а закон изменения $i_k = f(t)$ называют *прямолинейной коммутацией*.

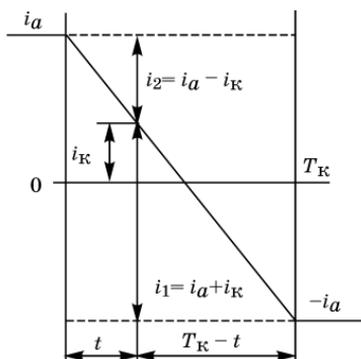


Рис. 1.21
Направление тока в катушке за период коммутации

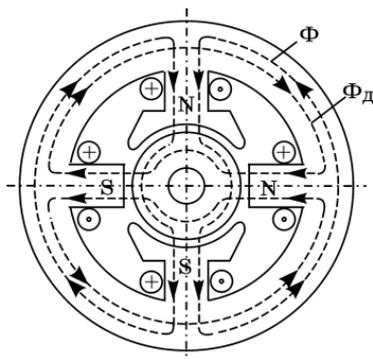


Рис. 1.22
Картина потоков главных и добавочных полюсов

Прямолинейная коммутация наиболее благоприятна для коллекторной машины, так как плотность тока на сбегающем и набегающем краях щетки одинакова и постоянна в течение всего периода коммутации.

При прямолинейной коммутации реактивная ЭДС самоиндукции

$$e_p = -L_k \frac{di_k}{dt} = -L_k \frac{d}{dt} \left[i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right) \right] = L_k \frac{2i_a}{T_k}.$$

Поскольку ток параллельной ветви i_a пропорционален току якоря I_a , а период коммутации T_k обратно пропорционален линейной скорости вращения коллектора v_k , следовательно и якоря v_a , то можно считать, что ЭДС e_p пропорциональна I_a и v_a .

Таким образом, процесс коммутации протекает наиболее благоприятно, когда $R_{щ} > R_k$, что достигается соответствующим выбором марки щеток, и когда реактивная ЭДС самоиндукции e_p уравновешена ЭДС вращения e_k катушки от внешнего поля в зоне коммутации. На практике равенства $e_p = \pm e_k$ добиваются с помощью добавочных или дополнительных полюсов (рис. 1.22, на примере двухполюсной машины).

Магнитное поле добавочных полюсов Φ_d должно не только компенсировать поперечное поле реакции якоря,

но и создавать определенное результирующее внешнее поле обратного, чем поле реакции якоря, знака. Только при этих условиях наводимая в катушке ЭДС e_k , пропорциональная результирующей индукции в зоне коммутации B_k и скорости вращения якоря v_a , будет уравновешивать реактивную ЭДС e_p .

Чтобы условие $e_p \pm e_k = 0$ выполнялось при различных режимах работы машины, обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря, магнитная цепь этих полюсов должна быть ненасыщенной, чтобы существовала линейная зависимость между индукцией B_k и током I_a . Обмотка добавочных полюсов состоит обычно из небольшого количества витков провода, сечение которого должно быть рассчитано на прохождение тока I_a .

Таким образом, добавочные полюсы позволяют практически избежать искрения щеток. Лишь при эксплуатации машин в тяжелых условиях (переменная нагрузка, большая перегрузка) может возникнуть искрение щеток, которое объясняется невозможностью точно выполнить условие $e_p \pm e_k = 0$ для всех режимов работы машины. В том случае, когда e_p не равно e_k , под действием результирующей ЭДС в коммутируемой катушке потечет добавочный ток i_d , который при $t = T_k$ будет разрываться щеткой, способствуя появлению искрения. Коммутация при $e_p > e_k$ называется замедленной, а при $e_p < e_k$ — ускоренной.

Экспериментальными исследованиями установлено, что увеличение ширины щетки улучшает процесс коммутации. В этом случае увеличивается период коммутации T_k и убывает скорость изменения тока в коммутируемой катушке, а вместе с ним и ЭДС самоиндукции e_p . Если, например, $b_{щ} = 2b_k$, то T_k возрастает в два раза по сравнению с T_k при $b_{щ} = b_k$, следовательно, в два раза уменьшается e_p . Но при $b_{щ} > b_k$ одновременно коммутируют несколько катушек и в каждой из них, если катушки расположены в том же реальном пазу якоря, наводится ЭДС взаимной индукции e_m от рядом расположенных коммутируемых катушек. Взаимную индукцию при одновременной коммутации катушек, расположенных в соседних реальных пазах, можно не учитывать. Учитывая, что

поток взаимной индукции всегда меньше потока самоиндукции, уменьшение e_p при увеличении $b_{щ}$ будет более заметным, чем увеличение результирующей реактивной ЭДС $e_p + e_m$.

1.6. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Генераторы постоянного тока с приводом от двигателей внутреннего сгорания или от электрических машин наряду с выпрямительными установками являются основными источниками постоянного тока. Свойства генераторов определяет система возбуждения, которая может быть независимой, параллельной или смешанной (на рисунке 1.23 Я1 и Я2 — выводы обмотки якоря, Н1 и Н2 — выводы независимой обмотки возбуждения, Ш1 и Ш2 — выводы параллельной обмотки возбуждения, С1 и С2 — выводы последовательной обмотки возбуждения, R_H — сопротивление нагрузки, R_p — реостат в цепи возбуждения).

Независимо от способа возбуждения напряжение и мощность генератора:

$$U = E_a - I_a R_a;$$

$$P_2 = UI_a = E_a I_a - (I_a)^2 R_a = P_{эм} - P_{эл},$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная мощность; R_a — сопротивление в цепи якоря; $P_{эл} = I_a^2 R_a$ — потери в цепи якоря.

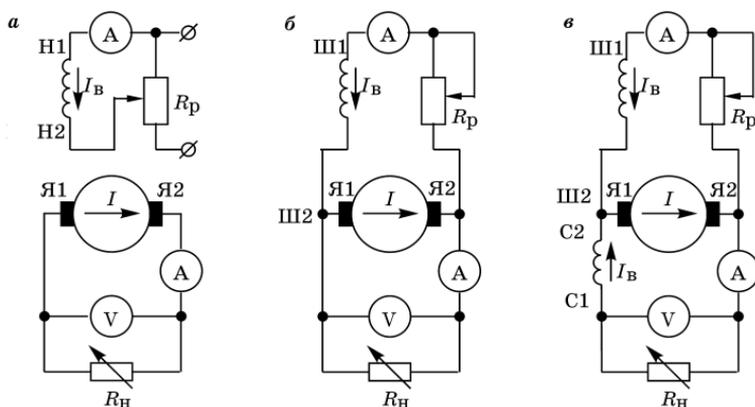


Рис. 1.23

Схемы независимого (а), параллельного (б) и смешанного (в) возбуждения генераторов

Если учесть, что механические потери P_m (на вентиляцию, трение в подшипниках и на коллекторе) и потери в стали P_c (на перемагничивание стали якоря) покрываются за счет приводного двигателя, то необходимая для привода генератора мощность, а также противодействующий приводу момент генератора:

$$P_1 = P_{эм} + P_m + P_c = P_2 + P_{эл} + P_m + P_c;$$

$$M = P_1 / \omega_2.$$

Об эксплуатационных свойствах генераторов судят по их характеристикам:

- холостого хода — зависимости напряжения на зажимах ненагруженного генератора от тока возбуждения $U = f(I_B)$ при постоянной частоте вращения якоря;
- внешней — зависимости напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки $U = f(I)$ при неизменном токе или сопротивлении в цепи возбуждения и постоянной частоте вращения якоря;
- регулировочной — зависимости тока возбуждения от тока нагрузки $I_B = f(I)$ при постоянном напряжении на зажимах генератора и постоянной частоте вращения якоря.

У генератора независимого возбуждения обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного напряжения. Сопротивление реостата R_p должно быть таким, чтобы диапазон изменения тока возбуждения был наибольшим. Независимое возбуждение используют в низковольтных генераторах, а также в случае, когда требуется большой диапазон регулирования напряжения.

По характеристике холостого хода (рис. 1.24а) судят о степени насыщения магнитной цепи генератора. При вращении якоря невозбужденного генератора напряжение на его зажимах обусловлено остаточным магнитным потоком $U = E_{ост} = c\Phi_{ост}\omega_2$. С появлением тока и потока возбуждения и согласным направлением потока возбуждения с $\Phi_{ост}$ напряжение возрастает.

Для снятия внешней характеристики (рис. 1.24б) генератор приводят во вращение с номинальной частотой $n_{2н}$ и подают такое возбуждение, чтобы при номинальной

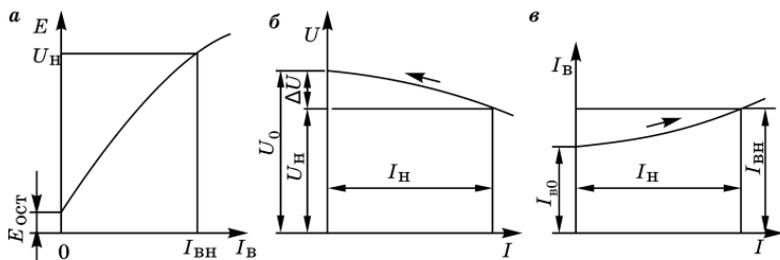


Рис. 1.24

Характеристики генератора независимого возбуждения: холостого хода (а), внешняя (б), регулировочная (в)

нагрузке I_n на зажимах генератора установилось номинальное напряжение U_n . Затем, постепенно уменьшая нагрузку и поддерживая $n_2 = n_{2n}$, при $R_B = \text{const}$ (R_B — сопротивление обмотки возбуждения и регулировочного реостата) записывают показания вольтметра. При уменьшении нагрузки напряжение генератора $U = E_a - I_a R_a$ повышается не только за счет снижения падения напряжения в цепи якоря $I_a R_a$, но и за счет увеличения ЭДС якоря E_a вследствие уменьшения размагничивающего действия реакции якоря.

Регулировочная характеристика генератора показана на рисунке 1.24в. С ростом нагрузки для поддержания напряжения на зажимах генератора при неизменной частоте вращения якоря необходимо увеличивать ток возбуждения, компенсируя возрастающим значением ЭДС якоря падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря. При уменьшении нагрузки необходимо соответственно снижать ток возбуждения.

Генераторы параллельного возбуждения являются наиболее распространенными, так как не требуют отдельного источника для питания цепи возбуждения. При вращении якоря в его обмотке остаточным магнитным потоком наводится ЭДС, под действием которой при отключенной нагрузке в цепи возбуждения появится ток, который в зависимости от включения обмотки возбуждения будет ослаблять остаточный поток или способствовать его возрастанию. В последнем случае возможен процесс самовозбуждения генератора. Действительно, для напряжения

на зажимах генератора u и тока возбуждения i_B можно записать:

$$u = i_B R_B + \frac{d(L_B i_B)}{dt}$$

или

$$u - i_B R_B = \frac{d(L_B i_B)}{dt},$$

где L_B — индуктивность обмотки возбуждения.

Если $u - i_B R_B > 0$, то и

$$\frac{d(L_B i_B)}{dt} > 0,$$

т. е. процесс в цепи возбуждения характеризуется нарастанием тока возбуждения. Этот процесс заканчивается при $u - i_B R_B = 0$. На рисунке 1.25а показана характеристика холостого хода генератора и зависимости $I_B R_B = f(t)$ цепи возбуждения при различных значениях R_B . Процесс самовозбуждения закончится в точках пересечения характеристики холостого хода с вольтамперной характеристикой, линия 2. При сопротивлении цепи возбуждения большем некоторого критического $R_{вкр}$ (касательная 1) процесс самовозбуждения становится практически невозможным.

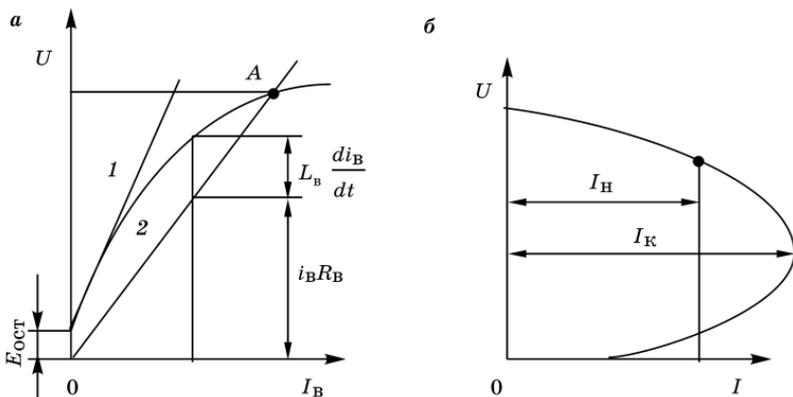


Рис. 1.25
 Процесс самовозбуждения генератора (а)
 и его внешняя характеристика (б)

Таким образом, для возбуждения генератора необходимы следующие условия: наличие остаточного потока; согласное действие потока, создаваемого обмоткой возбуждения, и остаточного потока; сопротивление цепи возбуждения меньше критического.

Характеристика холостого хода практически имеет тот же вид, что у генератора независимого возбуждения, поскольку падение напряжения в якорной цепи от тока возбуждения очень мало.

Что касается внешней характеристики (рис. 1.25б), то с ростом нагрузки напряжение на зажимах генератора падает за счет увеличения падения напряжения в якорной цепи вследствие реакции якоря, а также уменьшения тока возбуждения, так как обмотка возбуждения получает питание от зажимов генератора. При небольшой нагрузке поток в насыщенной машине изменяется незначительно. С увеличением нагрузки ток нагрузки сначала растет за счет непропорционального изменения напряжения на зажимах генератора и сопротивления нагрузки $I = U/R_n$. С дальнейшим увеличением нагрузки происходит рост падения напряжения в якорной цепи $I_a R_a$ и снижение напряжения на зажимах генератора. При критическом токе нагрузки $I_{кр} = (2-2,5)I_n$ ток возбуждения значительно уменьшается, вследствие чего магнитная система машины становится ненасыщенной. В этом случае малейшее снижение сопротивления нагрузки ведет к исчезновению напряжения. Ток в цепи нагрузки I_k протекает в этом случае под действием ЭДС от остаточного поля. Этот ток, который можно называть током установившегося короткого замыкания генератора параллельного возбуждения, меньше номинального и неопасен для машины.

Порядок снятия внешней характеристики генератора параллельного возбуждения такой же, как и для генератора с независимым возбуждением. Для поддержания напряжения на зажимах при росте нагрузки необходимо увеличивать ток возбуждения, компенсируя убывание потока и падение напряжения в якорной цепи.

У генератора смешанного возбуждения основной является параллельная обмотка возбуждения, а последова-

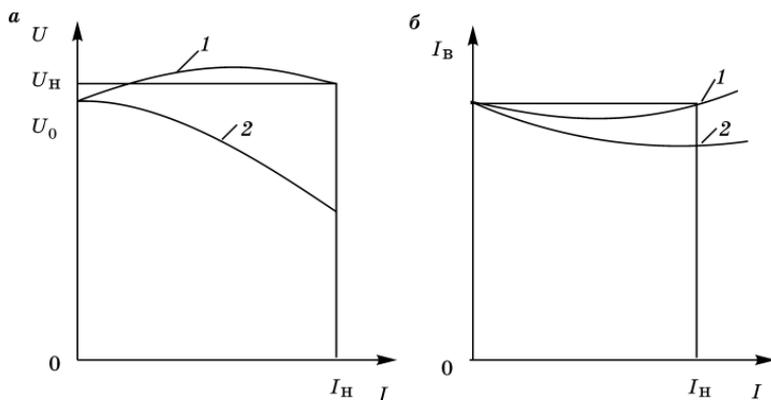


Рис. 1.26
Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики генератора смешанного возбуждения

тельная обмотка играет вспомогательную роль. Число витков последовательной обмотки выбирают таким, чтобы при номинальном токе нагрузки ее поток мог компенсировать падение напряжения в цепи якоря. В этом случае при номинальной нагрузке получим напряжение U , равное напряжению при холостом ходе, и внешняя характеристика генератора будет иметь вид кривой 1 (рис. 1.26а). На том же рисунке показана внешняя характеристика с противовключением (кривая 2), когда поток последовательной обмотки направлен встречно потоку параллельной обмотки. Противовключение применяют в случаях, когда требуется получить крутопадающую внешнюю характеристику, например в сварочных генераторах.

Характеристика холостого хода не отличается от характеристики холостого хода генератора параллельного возбуждения. Регулировочная характеристика при согласном включении обмоток возбуждения показана на рисунке 1.26б. Отметим, что при смешанном способе возбуждения генераторы небольшой мощности, если поддерживать частоту вращения якоря, могут работать практически без регуляторов напряжения в цепи возбуждения.

В таблице 1.1 приведены технические данные генераторов серии 2П в защищенном исполнении с самовентиляцией (2ПН) и в закрытом исполнении с естественным

Таблица 1.1

Технические данные генераторов серии 2П

Типоразмер генератора	Мощность, кВт	Напряжение, В	$n_{2\pi}$, об/мин	КПД, %
2ПН100МУХЛ4	0,37	115 230	1500	61,4
	1,25	115 230	3000	76
2ПН100ЛУХЛ4	0,55	115 230	1500	63,3
	1,8	115 230	3000	78,5
2ПН112МУХЛ4	0,75	115 230	1500	64,5
2ПН112МУХЛ4	2,8	115 230	3000	76,5
2ПН112ЛУХЛ4	4	115 230	3000	80,5
2ПН132ЛУХЛ4	3	115 230 460	1500	77
	5,5	115 230 460	1500	81,5
2ПН160ЛУХЛ4	16	115 230	3000	84,5
	4	115 230	1000	78,5
2ПН180МУХЛ4	7,5	115 230 460	1500	82
	22	230	3000	87,5
	5,5	115 230	1000	80,0
2ПН180ЛУХЛ4	11	115 230 460	1500	83
	30	230	3000	89
	7,5	115 230	1000	81
	12,5	115 230 460	1500	84,5
2ПН200МУХЛ4	10	115 230	1000	81
2ПН200МУХЛ4	18,5	115 230 460	1500	85,5
	45	220/320	3000	89
2ПН200ЛУХЛ4	22	230 460	1500	87,5
2ПН225МУХЛ4	18,5	115 230	1000	82,3
	30	115 230 460	1500	85,3
2ПН225ЛУХЛ4	25	230	1000	83,5
	37	230 460	1500	86,5
2ПН250МУХЛ4	45	115	1500	85
	55	230 460	1500	87

охлаждением (2ПБ) с высотой оси вращения (габарита) 100–250 мм. Генераторы обеспечивают регулирование напряжения от номинального значения до нуля при независимом возбуждении, до $0,5U_H$ при параллельном возбуждении и до $0,8U_H$ при смешанном возбуждении. Режим работы продолжителен во всем диапазоне напряжений. Генераторы выполняются с направлением вращения против часовой стрелки со стороны коллектора. В обозначении: M и L — средняя и большая длина сердечника якоря; УХЛ4 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69 (УХЛ — для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренным и холодным климатом — от $+40$ до -45°C , 4 — для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемым климатическими условиями).

1.7. СВАРОЧНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Генераторы для дуговой сварки представляют собой особый вид электрических машин постоянного тока. Наибольшее распространение получили сварочные генераторы с крутопадающими внешними характеристиками, работающие по двум схемам — с независимым возбуждением и с самовозбуждением. Приводом генераторов служат асинхронные двигатели или двигатели внутреннего сгорания. Установку из сварочного генератора с самовозбуждением и двигателя внутреннего сгорания называют сварочным агрегатом. Сварочные агрегаты используют в основном там, где отсутствует электрическая сеть. Широкое распространение получили сварочные агрегаты АСБ, АДБ с бензиновыми двигателями и АСД, АДД с дизельными двигателями.

Генератор с независимым возбуждением имеет обмотку возбуждения с w_v витками, а также размагничивающую обмотку с w_p витками, включенную в сварочную цепь последовательно с обмоткой якоря (рис. 1.27). Обмотка независимого возбуждения питается от сети переменного тока через феррорезонансный стабилизатор напряжения (СН) и блок выпрямителей (В).

Ток возбуждения I_v намагничивающей обмотки образует основной поток Φ_v и поток рассеяния $\Phi_{вс}$. Ток якоря I_a ,

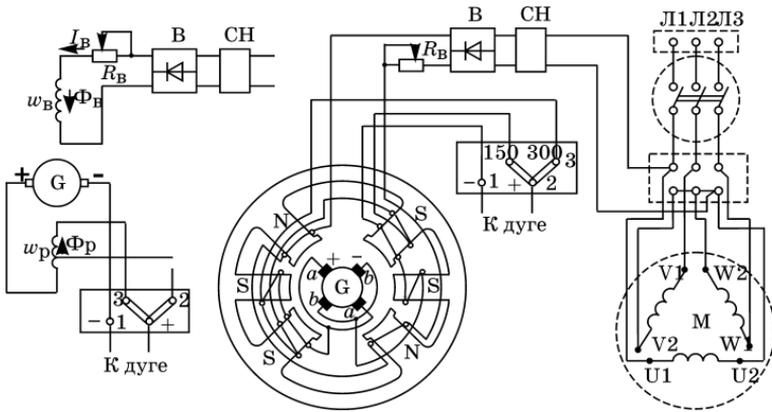


Рис. 1.27

Схема сварочного генератора независимого возбуждения

протекающий и по размагничивающей обмотке, создает основной поток Φ_p и поток рассеяния $\Phi_{рс}$. Результирующий поток основных полюсов $\Phi_{рез} = \Phi_v - \Phi_{рс}$.

Магнитные поля рассеяния $\Phi_{вс}$ и $\Phi_{рс}$, замыкающиеся помимо якоря через дополнительные полюсы n и s , усиливают магнитное поле дополнительного полюса полярности s и ослабляют поле дополнительного полюса полярности n . В связи с этим действие дополнительного полюса n становится практически незаметным, и в сварочных генераторах дополнительных полюсов полярности n , как правило, нет. При отсутствии одного дополнительного полюса при проектировании сварочного генератора принимают определенные меры для поддержания условий хорошей коммутации. С этой целью полюсные наконечники дополнительных полюсов несколько расширяют по окружности якоря.

По такой схеме работают генераторы ГСО-300 и ГСО-500 на номинальные сварочные токи соответственно 300 и 500 А.

С увеличением тока в сварочной цепи будет увеличиваться поток Φ_p , а поток Φ_n будет оставаться неизменным. При этом напряжение на зажимах генератора будет падать, создавая падающую внешнюю характеристику генератора. Регулирование сварочного тока ступенчато-плавное. Степень больших токов обеспечивается включением лишь части витков обмотки w_p , т. е. уменьшением

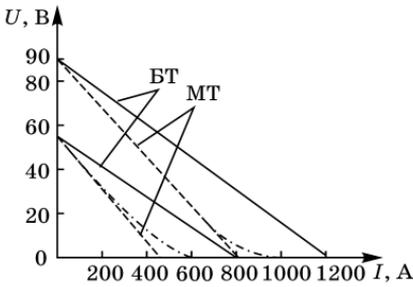


Рис. 1.28
Внешние характеристики сварочного генератора независимого возбуждения для ступени больших токов (БТ) и малых токов (МТ)

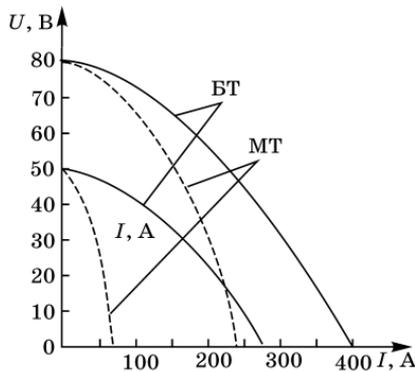
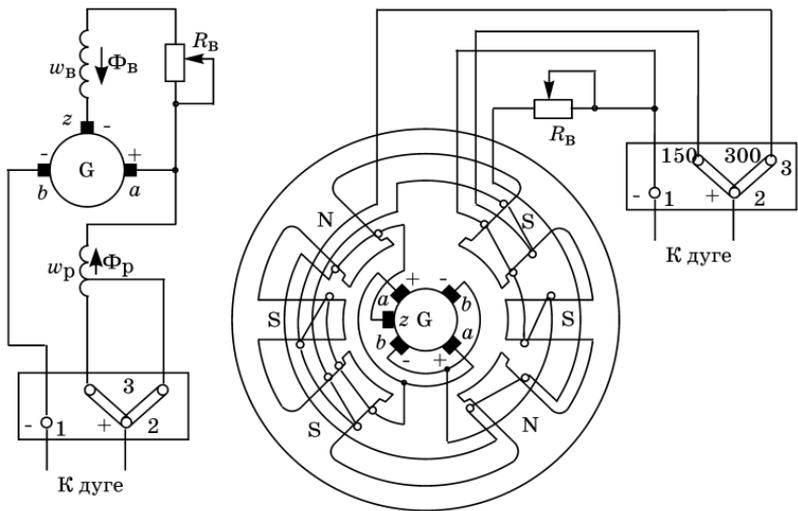


Рис. 1.29
Схема сварочного генератора с самовозбуждением и его внешние характеристики при ступенях больших (БТ) и малых (МТ) токах

размагничивающего потока Φ_p , а степень малых токов — включением всех витков обмотки w_p . Плавное регулирование сварочного тока в пределах каждой ступени осуществляется изменением тока I_B обмотки независимого возбуждения с помощью сопротивления R_B . Увеличение тока I_B приводит к увеличению напряжения холостого хода к росту сварочного тока (рис. 1.28).

На рисунке 1.29 показана схема сварочного генератора с самовозбуждением также только с дополнительными

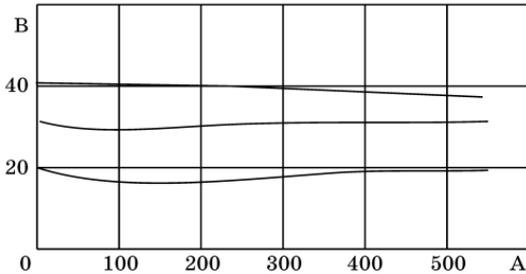
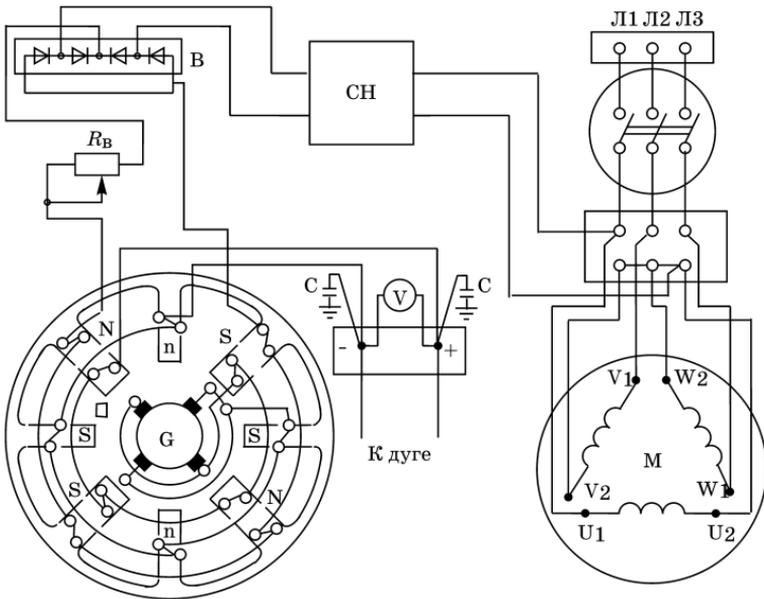


Рис. 1.30

Схема и внешние характеристики сварочного генератора ГСГ-500-1

полюсами полярности s . Намагничивающая обмотка w_b расположена на основных полюсах полярности N , а последовательная размагничивающая обмотка w_p — на основных полюсах полярности S .

Питание намагничивающей обмотки осуществляется от напряжения той части якоря, которая находится под воздействием складывающихся потоков Φ_b и реакции якоря Φ_a . При расчете генератора изменения потоков размагничивающей обмотки Φ_p и реакции якоря Φ_a подбирают так, чтобы обусловливаемая результирующим потоком ЭДС E_{zb} оставалась практически постоянной при любом токе якоря. Падение напряжения в обмотке якоря невелико, и напряжение U_{zb} , питающее намагничивающую обмотку возбуждения, также остается практически неизменным.

Для автоматической и полуавтоматической сварки в среде защитных газов применяют сварочные преобразователи ПСГ-500 из трехфазного асинхронного двигателя и генератора ГСГ-500 независимого возбуждения с жесткой внешней характеристикой. Номинальный ток 500 А, номинальное напряжение 40 В, пределы регулирования сварочного тока 60–500 А при напряжении 16–40 В, напряжение холостого хода 18–42 В. Для получения жесткой внешней характеристики последовательная обмотка включена так, чтобы она действовала согласованно с обмоткой независимого возбуждения (см. рис. 1.30). По такой схеме работает и сварочный преобразователь ПСГ-350 с генератором ГСГ-350.

1.8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Электромашинный усилитель (ЭМУ) — это специальный генератор постоянного тока с продольно-поперечным возбуждением. Его применяют для регулирования напряжения генераторов постоянного и переменного тока и частоты вращения электроприводов. Наиболее широко ЭМУ используют в системах автоматического регулирования, прежде всего в автоматизированных электроприводах, где он совмещает функции генератора и усилителя.

Электромашинный усилитель отличается от обычных машин постоянного тока тем, что для его возбуждения

используется не только магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения (продольный поток), но и магнитный поток, создаваемый током обмотки якоря (поперечный поток). Схема электромашинного усилителя показана на рисунке 1.31. Обмотку возбуждения ОУ принято называть обмоткой управления. Обмотка управления питается от внешнего источника электрической энергии, и ток в ней — ток управления — составляет несколько десятков миллиампер. Этот ток создаст по продольной оси небольшой поток управления Φ_y .

Якорь ЭМУ не отличается от якоря обычной машины постоянного тока. При его вращении в магнитном поле обмотки управления Φ_y в его обмотке индуцируется ЭДС

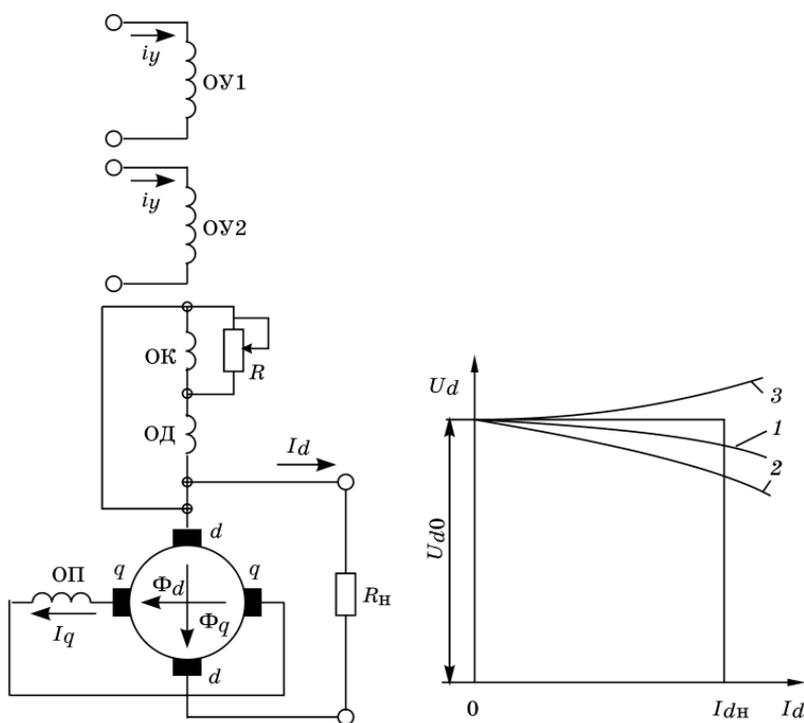


Рис. 1.31
Схема ЭМУ:

ОУ — обмотки управления; ОК — обмотка компенсационная; ОД — обмотка добавочных полюсов; ОП — обмотка подмагничивающая.

$E_q = c\Phi_y\omega_2$. Величина ЭДС обычно составляет несколько вольт. Щетки поперечной оси q замкнуты накоротко. Ток короткозамкнутой цепи $I_q = E_q/R_q$. Сопротивление поперечной цепи R_q якоря невелико и складывается из сопротивления обмотки якоря и переходного контактного сопротивления между щетками и коллектором (а при наличии поперечной подмагничивающей обмотки и из сопротивления этой обмотки). Поэтому ток в цепи значителен и создает большой поперечный магнитный поток Φ_q (в обычных машинах постоянного тока это поток реакции якоря).

Поперечный поток неподвижен в пространстве, хотя и создается током, проходящим по обмотке вращающегося якоря. Этот поток является рабочим магнитным потоком ЭМУ, и от него в той же обмотке якоря наводится продольная ЭДС $E_d = c\Phi_q\omega_2$. Щетки на продольной оси d — рабочие, к ним подключают нагрузку.

Магнитная система ЭМУ ненасыщенна, вследствие чего потоки и ЭДС в нем пропорциональны соответствующим токам. Так, поток управления Φ_y и поперечная ЭДС E_q пропорциональны току управления, т. е. $\Phi_y \equiv I_y$ и $E_q = c\Phi_y\omega_2 \equiv \omega_2 I_y$. Соответственно поперечный поток Φ_q и продольная ЭДС E_d пропорциональны поперечному току I_q , т. е. $\Phi_q \equiv I_q$ и $E_d = c\Phi_q\omega_2 \equiv \omega_2 I_q$. Поскольку $I_q = E_q/R_q$, следовательно, при постоянном значении R_q ток $I_q \equiv \omega_2 I_y$ и $E_d \equiv \omega_2 I_q \equiv \omega_2^2 I_y$ или $E_d \equiv k\omega_2 I_y$, где k — общий коэффициент пропорциональности между E_d и $\omega_2^2 I_y$.

Таким образом, величина ЭДС по продольной оси E_d пропорциональна току управления и квадрату угловой скорости якоря. Для того чтобы при данном токе управления получить наибольшую величину ЭДС E_d , привод якоря ЭМУ осуществляют от двигателя с повышенной частотой вращения, чаще от двухполюсного короткозамкнутого асинхронного двигателя. Жесткая механическая характеристика асинхронного двигателя позволяет поддерживать работу ЭМУ под различной нагрузкой практически при постоянной частоте вращения.

При включении нагрузки на продольные щетки по продольной цепи потечет продольный ток или ток нагрузки

$I_d = E_d / \Sigma R_d$, где ΣR_d — сумма всех сопротивлений по оси d . Этот ток также создает поток реакции якоря, но уже продольный Φ_d всегда направленный навстречу потоку управления Φ_y . Поскольку поток Φ_y весьма мал, то даже при небольших токах I_d суммарный магнитный поток по продольной оси и напряжение на выходе ЭМУ уменьшаются почти до нуля. Таким образом, продольная реакция якоря размагничивает ЭМУ.

Чтобы ЭМУ был работоспособен, необходимо предотвратить воздействие тока нагрузки на магнитный поток управления. С этой целью на полюсах располагают компенсационную обмотку, которая служит для компенсации продольного потока реакции якоря и включается в цепь рабочих щеток последовательно. Таким образом, при наличии компенсационной обмотки магнитный поток по продольной оси нагруженного ЭМУ имеет три составляющие — это поток управления Φ_y , поток реакции якоря Φ_d и поток компенсационной обмотки Φ_k . Если по величине поток компенсационной обмотки равен продольному потоку реакции якоря $\Phi_k = \Phi_d$, то компенсация является полной или нормальной. При $\Phi_k < \Phi_d$ имеет место недокомпенсация и при $\Phi_k > \Phi_d$, соответственно, перекомпенсация.

Обычно продольный поток реакции якоря в десятки или сотни раз больше потока управления. Поэтому самая небольшая неточность в расчете компенсационной обмотки может привести к значительному изменению результирующего продольного магнитного потока и ЭДС ЭМУ при изменении тока нагрузки. Практически компенсацию уточняют опытным путем после изготовления каждой машины. С этой целью компенсационную обмотку выполняют с числом витков больше необходимого, а параллельно ей включают регулировочное сопротивление R . В этом случае по компенсационной обмотке проходит только часть тока нагрузки. Настройку компенсации проводят изменением величины регулировочного сопротивления. При увеличении сопротивления поток компенсационной обмотки возрастает, а при уменьшении сопротивления он снижается.

Рабочие свойства ЭМУ определяются, прежде всего, его внешними характеристиками. При работе ЭМУ в обмотке якоря одновременно протекают два тока — поперечный I_q и продольный I_d , при этом в двух четвертях обмотки эти токи совпадают по направлению, а в двух других — противоположны один другому. Результирующий ток, определяющий электрические потери в обмотке якоря,

$$I = \sqrt{\frac{1}{2}(I_d + I_q)^2 + \frac{1}{2}(I_d - I_q)^2} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}.$$

Внешние характеристики ЭМУ представляют собой зависимости выходного напряжения от продольного тока $U_d = f(I_d)$ при постоянной частоте вращения якоря ($n_2 = \text{const}$) и постоянном токе управления ($I_y = \text{const}$).

При перекомпенсации (кривая 3 на рисунке 1.31) избыточный поток компенсационной обмотки увеличивает результирующий продольный поток, и выходное напряжение может расти с ростом тока нагрузки. Это будет продолжаться до насыщения магнитной цепи машины. Таким образом, при перекомпенсации с увеличением тока нагрузки осуществляется положительная обратная связь. При недокомпенсации (кривая 2), когда результирующий поток по продольной оси уменьшается, обратная связь отрицательная. Отрицательная обратная связь всегда стабилизирует систему, препятствуя отклонению ее от заданного режима.

При ненасыщенной магнитной цепи машины обратные связи жесткие.

Усилительные свойства ЭМУ оценивают коэффициентом усиления, который равен отношению мощности, отдаваемой усилителем $P = UI_d$, к мощности, затрачиваемой в цепи управления $P_y = U_y I_y = (I_y)^2 R_y$, где R_y — сопротивление обмотки управления.

В ЭМУ усиление сигнала, поступившего на обмотку управления, происходит двумя ступенями, при этом коэффициент усиления первой ступени

$$k_{y1} = \frac{P_q}{P_y} = \frac{E_q I_q}{I_y^2 R_y},$$

где $P_q = E_q I_q$ — мощность поперечной цепи якоря.

Учитывая, что

$$E_q = c\Phi_y\omega_2 \frac{2}{\pi} w_k n p \Phi_y \omega_2 = \frac{2}{\pi} w_a p \Phi_y \omega_2,$$

где $w_a = w_k n$ — число последовательно соединенных витков обмотки якоря (w_k — число витков катушки; n — число катушек, входящих в параллельную ветвь).

Для двухполюсной машины (число пар полюсов $p = 1$):

$$k_{y1} = \frac{E_q I_q}{I_y^2 R_y} = \frac{2\omega_2}{\pi} \cdot \frac{\Phi_y w_a I_q}{I_y^2 R_y}.$$

Умножая числитель и знаменатель последнего выражения на $w_y \sigma_y$ (w_y — число витков обмотки управления, $\sigma_y = (\Phi_y + \Phi_{cy})/\Phi_y \approx 1,1-1,15$ — коэффициент магнитного рассеяния обмотки управления, Φ_{cy} — поток рассеяния обмотки управления), находим:

$$\begin{aligned} k_{y1} &= \frac{2\omega_2}{\pi} \cdot \frac{\Phi_y w_a I_q}{I_y^2 R_y} \cdot \frac{w_y \sigma_y}{w_y \sigma_y} = \frac{2\omega_2}{\pi \sigma_y} \cdot \frac{\Phi_y w_y \sigma_y}{I_y R_y} \cdot \frac{I_q w_a}{I_y w_y} = \\ &= \frac{2\omega_2}{\pi \sigma_y} \cdot \frac{L_y}{R_y} \cdot \frac{F_q}{F_y} = \frac{2\omega_2}{\pi \sigma_y} \cdot T_y \frac{F_q}{F_y}, \end{aligned}$$

где $L_y = \Phi_y w_y y_y / I_y$ — индуктивность обмотки управления; $F_q = I_q w_a$ — МДС обмотки якоря по поперечной оси; $F_y = I_y w_y$ — МДС обмотки управления; $T_y = L_y / R_y$ — постоянная времени обмотки управления.

Аналогичное выражение получим и для коэффициента усиления второй ступени (считая приближенно равными выходную мощность P и мощность усилителя по продольной оси $P_d = U_d I_d$):

$$\begin{aligned} k_{y2} &= \frac{P}{P_q} \approx \frac{P_d}{P_q} = \frac{E_d I_d}{I_q^2 R_q} = \frac{2\omega_2}{\pi} \cdot \frac{\Phi_q w_a I_d}{I_q^2 R_q} \cdot \frac{w_a \sigma_a}{w_a \sigma_a} = \\ &= \frac{2\omega_2}{\pi \sigma_a} \cdot \frac{\Phi_q w_a \sigma_a}{I_q R_q} \cdot \frac{I_d w_a}{I_q w_a} = \frac{2\omega_2}{\pi \sigma_y} \cdot \frac{L_q}{R_q} \cdot \frac{F_d}{F_q} = \frac{2\omega_2}{\pi \sigma_a} \cdot T_q \frac{F_d}{F_q}, \end{aligned}$$

где σ_a — коэффициент магнитного рассеяния обмотки якоря ($\sigma_a \approx 1,15-1,20$); R_q — сопротивление поперечной цепи якоря (сопротивление якорной обмотки и переходное

контактное сопротивление «щетка q — коллектор»); $L_q = \Phi_q w_a \sigma_a / I_q$ — индуктивность обмотки якоря по поперечной оси; $F_d = I_q w_a$ — МДС обмотки якоря по продольной оси; $T_q = L_q / R_q$ — постоянная времени поперечной цепи.

Результирующий коэффициент усиления ЭМУ

$$k_y = k_{y1} k_{y2} = \frac{4\omega_2^2}{\pi \sigma_a \sigma_y} T_y T_q \frac{F_d}{F_y}.$$

Таким образом, при постоянных параметрах ЭМУ его коэффициент усиления k_y определяется, прежде всего, квадратом угловой скорости якоря. Обычно $k_y = 8000$ – $20\,000$.

Высоким значением коэффициента усиления не исчерпываются достоинства ЭМУ. Второе его положительное свойство заключается в быстродействии. Быстродействие зависит от скорости протекания переходных процессов в машине, которые определяются постоянными времени цепи управления T_y и поперечной цепи якоря T_q . В зависимости от мощности ЭМУ $T_y = 0,005$ – $0,025$ с и $T_q = 0,03$ – $0,15$ с.

К достоинствам ЭМУ относится и возможность суммирования сигналов, для чего используют несколько обмоток управления (обычно от двух до четырех), на каждую из которых подается определенный сигнал.

Один из недостатков ЭМУ — необходимость в специальных мерах по улучшению коммутации вследствие высокой частоты вращения якоря. Коммутация происходит как под продольными (рабочими), так и под поперечными щетками. Для улучшения коммутации под продольными щетками в ЭМУ устанавливают дополнительные полюсы, обмотку которых ОД включают последовательно в рабочую цепь.

В поперечной цепи якоря ток в несколько раз меньше, чем в продольной оси, поэтому в ЭМУ небольшой мощности дополнительные полюсы по поперечной оси не устанавливают. Для улучшения коммутации под поперечными щетками часто используют другой способ — уменьшают ток в этой цепи. С этой целью на статоре располагают поперечную подмагничивающую обмотку ОП. Благодаря

этому сопротивление поперечной цепи якоря значительно увеличивается. Ток в этой цепи уменьшается, но величина потока Φ_q не изменяется. Увеличение общего сопротивления по поперечной оси за счет подмагничивающей обмотки благоприятно сказывается и на стабильности работы ЭМУ. В этом случае доля переходного контактного сопротивления поперечных щеток с коллектором в общем сопротивлении поперечной цепи снижается, следовательно, уменьшается и изменение сопротивления этой цепи, например вследствие загрязнения коллектора, изменения силы нажатия пружины на щетки и по другим причинам.

Своеобразие принципа действия и использования ЭМУ обусловило особенности их конструкции по сравнению с конструкцией обычных генераторов постоянного тока. ЭМУ выполняются только двухполюсными, полюсы значительно шире, чем в обычном генераторе, статор собирают из тонких стальных листов, чтобы магнитная проводимость по обеим осям машины была приблизительно одинаковой, величина воздушного зазора минимально возможная (для увеличения магнитной проводимости). ЭМУ малой и средней мощности выполняют обычно в одном корпусе с приводным двигателем, образуя усилительный агрегат.

1.9. ТАХОГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тахогенераторы постоянного тока представляют собой маломощные генераторы, выходное напряжение которых пропорционально угловой скорости ротора ω_2 . Конструктивно тахогенератор представляет собой обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов. При таком способе возбуждения ток нагрузки равен току якоря $I_a = U/R_H$, где R_H — сопротивление нагрузки. Основное уравнение тахогенератора:

$$U = E_a - I_a R_a = c\Phi\omega_2 - \frac{U}{R_H} R_a,$$

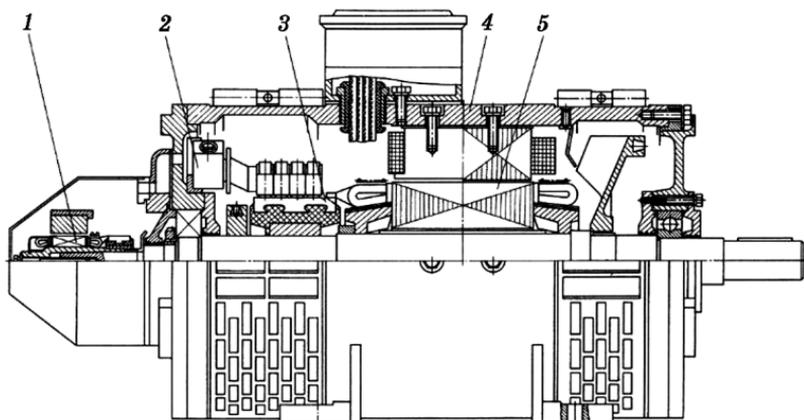


Рис. 1.32

Вид машины постоянного тока серии 2П:

1 — тахогенератор; 2 — traversа со щетками; 3 — коллектор; 4 — станина; 5 — якорь.

откуда

$$U = \frac{c\Phi\omega_2}{1 + \frac{R_a}{R_n}}$$

Для уменьшения влияния реакции якоря и колебаний переходного контактного сопротивления щеток на линейную зависимость $U = f(\omega_2)$ сопротивление нагрузки R_n должно быть как можно бóльшим. С этой же целью в тахогенераторах используют металлографитные щетки, а магнитную систему выполняют сильно насыщенной. При этих условиях возможные изменения тока возбуждения будут мало влиять на изменение потока Φ .

У некоторых машин постоянного тока тахогенераторы являются их встроенной составной частью (рис. 1.32).

1.10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Свойства двигателей постоянного тока, как и генераторов, определяют способы возбуждения. Схемы двигателей отличаются от схем генераторов только наличием пускового реостата в цепи якоря.

В двигателях постоянного тока относительная величина падения напряжения на якоре $I_{ан} R_a / U_n = 0,02-0,1$, где $I_{ан}$ — номинальный ток якоря, U_n — номинальное напряжение на зажимах двигателя. При пуске двигателя в ход без реостата пусковой якоря $I_{ап} = (50...10)/I_{ан}$ недопустимо велик. По этой причине пуск в ход двигателя путем непосредственного включения

якоря в сеть применяется только для двигателей весьма малой мощности, измеряемой десятками или сотнями ватт, имеющих относительно большое сопротивление цепи якоря. Во всех других случаях пусковой ток ограничивают включением в цепь якоря добавочного сопротивления $R_{п}$, которое может состоять из нескольких последовательно соединенных резисторов. В этом случае $I_{ап} = U / (R_a + R_{п})$. По мере разгона двигателя сопротивление $R_{п}$ уменьшают и полностью отключают после разбега двигателя. После разбега напряжение $U = E_a + I_a R_a$ уравнивает практически ЭДС якоря.

У двигателей параллельного возбуждения (рис. 1.33) ток возбуждения I_b не зависит от тока якоря I_a (тока нагрузки), так как питание обмотки возбуждения (ОВ) по существу независимое. В цепь обмотки возбуждения включен регулировочный реостат R_b , а в цепь якоря — пусковой реостат $R_{п}$.

Мощность на валу двигателя:

$$P_2 = P_1 - P_{эл} - P_b - P_m - P_c,$$

где $P_1 = UI$ — мощность, потребляемая из сети; $P_{эл} = I_a^2 R_a$ — потери в цепи якоря; $P_b = UI_b$ — мощность, потребляемая обмоткой возбуждения; P_m — потери механические; P_c — потери в стали якоря.

Основной характеристикой двигателей постоянного тока является механическая характеристика — зависимость

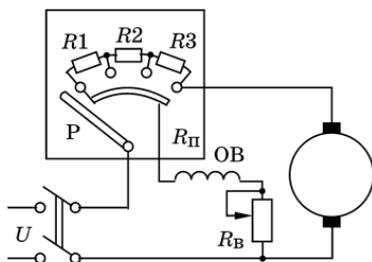


Рис. 1.33

Схема двигателя параллельного возбуждения:

R_1, R_2, R_3 — резисторы пускового реостата; P — рукоятка пускового реостата.

угловой скорости вращения вала от момента на валу $\omega_2 = f(M)$ при постоянном значении напряжения, тока возбуждения и сопротивления в цепи возбуждения ($U, I_B, R_B = \text{const}$). Из выражений для ЭДС $E_a = c\Phi\omega_2$ и момента $M = c\Phi I_a$ находим:

$$\omega_2 = \frac{E_a}{c\Phi} = \frac{U - I_a R_a}{c\Phi} = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M R_a}{c^2 \Phi^2}.$$

Если в цепь якоря включить добавочное сопротивление R_d , рассчитанное на длительное протекание тока якоря, тогда

$$\omega_2 = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M(R_a + R_d)}{c^2 \Phi^2}.$$

У двигателя параллельного возбуждения можно считать, что магнитный поток $\Phi = \text{const}$, поэтому

$$\omega_2 = \omega_{20} - \Delta\omega_2,$$

где $\omega_{20} = U/(c\Phi)$ — угловая скорость при идеальном (теоретическом) холостом ходе, когда $I_a = 0$; $\Delta\omega_2 = M(R_a + R_d)/(c^2 \Phi^2)$ — изменение угловой скорости при нагрузке.

При $R_d = 0$ механическая характеристика жесткая (естественная характеристика), так как падение напряжения $I_a R_a$ в цепи якоря при номинальной нагрузке составляет всего 3–5% от U_n .

Реакция якоря, уменьшая поток Φ при нагрузке, стремится придать естественной механической характеристике отрицательный угол наклона, при котором частота вращения ω_2 возрастает с увеличением момента M . Однако двигатель с такой характеристикой в большинстве электроприводов устойчиво работать не может. Поэтому современные двигатели средней и большой мощностей с параллельным возбуждением часто имеют небольшую последовательную обмотку возбуждения, которая придает механической характеристике необходимый наклон. МДС этой обмотки при номинальном токе I_n составляет около 10% от МДС параллельной обмотки.

При включении добавочных сопротивлений в цепь якоря угол наклона механической характеристики возра-

стает, и наряду с естественной характеристикой 1 (рис. 1.34) образуется семейство реостатных механических характеристик 2, 3, 4, соответствующих определенным ступеням добавочных сопротивлений в цепи якоря.

У двигателя смешанного возбуждения последовательная обмотка возбуждения играет вспомогательную роль, смягчая зависимость $\omega_2 = f(M)$

при ее согласном включении с параллельной обмоткой возбуждения, или способствуя стабилизации скорости вращения при встречном включении с параллельной обмоткой.

Согласно изложенному выше, регулирование угловой скорости (или частоты вращения n_2 , об/мин) двигателей параллельного и смешанного возбуждения осуществляется изменением подводимого напряжения U , включением в цепь якоря добавочного сопротивления R_d , а также изменением потока Φ . Введение добавочного сопротивления в цепь якоря, рассчитанного на длительное протекание в нем тока якоря, уменьшает угловую скорость двигателя. Данный способ регулирования в случае значительного диапазона изменения частоты вращения неэкономичен, поскольку потери в добавочных сопротивлениях $I_a^2 R_d$ составляют значительную долю потребляемой мощности.

Регулирование двигателей параллельного возбуждения изменением магнитного потока осуществляют с помощью реостата в цепи возбуждения. Если принять сопротивление цепи якоря $R_a = 0$, то $\omega_2 = U / (c\Phi)$. Угловая скорость двигателя изменяется практически обратно пропорционально величине потока. С помощью реостата в цепи возбуждения можно лишь уменьшать поток Φ , поэтому изменять частоту вращения двигателя можно только вверх от номинальной.

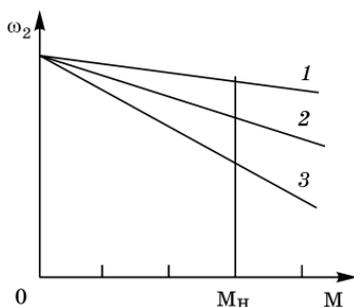


Рис. 1.34
Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

В таблице 1.2 приведены технические данные двигателей постоянного тока серии 4ПНМ независимого (параллельного) возбуждения и 4ПНМС смешанного возбуждения. В обозначении двигателей после 4П: Н — защищенное исполнение с самовентиляцией; М — модификация; М и L — средняя и большая длина сердечника якоря; О4 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69 (О — общеклиматический — для эксплуатации во всех макроклиматических районах от +50 до -65°C; 4 — для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями).

Таблица 1.2

Технические данные двигателей серии 4ПНМ и 4ПНМС

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Напряжение якоря, В	n_2 , об/мин	
			$n_{2н}$	$n_{2мак}$
4ПНМ112МО4	0,63	220	750	2500
	0,90	220	1000	3500
	1,70	220	1600	4000
	2,50	220	2360	
	3,55	220	3250	
4ПНМ112ЛО4	0,80	220	670	2500
	1,40	220	950	3500
	2,50	220	1500	4000
	3,35	220	2120	
	5,30	220	3000	
4ПНМ132МО4	1,60	220	710	2500
	2,50	220	1000	3000
	4,00	220	1500	4000
	7,1	220	2240	4000
	10,60	220	3000	
4ПНМ132ЛО4	2,00	220	710	2500
	3,15	220	1000	3000
	5,50	220	1500	4000
	8,50	220	2240	4000
	14,00	220	3150	4000

Продолжение табл. 1.2

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Напряжение якоря, В	n_2 , об/мин	
			$n_{2н}$	n_{2max}
4ПНМ160МО4	3,00	220	750	2500
	5,00	220	1000	2500
	7,50	220	1500	4000
	13,00	220	2120	4000
	18,00	220	3150	4000
4ПНМ160ЛО4	4,00	220	710	2500
	6,30	220	1060	3000
	11,0	220	1400	4000
	16,0	220	2000	4000
4ПНМ180МО4	5,60	220	710	2500
	8,00	220	1120	3000
	15,00	220	1500	3700
	25,00	220	2240	
4ПНМ180ЛО4	7,1	220	750	2500
	11,0	220	1000	3000
	18,5	220	1400	3700
4ПНМС132МО4	4	220	1550	4000
4ПНМС132ЛО4	5,5		1500	
4ПНМС160МО4	7,5		1400	
4ПНМС160ЛО4	11,0		1400	
4ПНМС180МО4	15,0		1550	3700

Двигатели допускают длительную работу при регулировании частоты вращения:

- от номинальной до максимальной путем уменьшения тока возбуждения при номинальном токе якоря и напряжении на якоре;
- вниз от номинальной до нуля изменением напряжения на якоре.

Двигатели выпускаются на напряжение 110, 220 и 440 В. В таблице приведены данные для двигателей на напряжение 220 В.

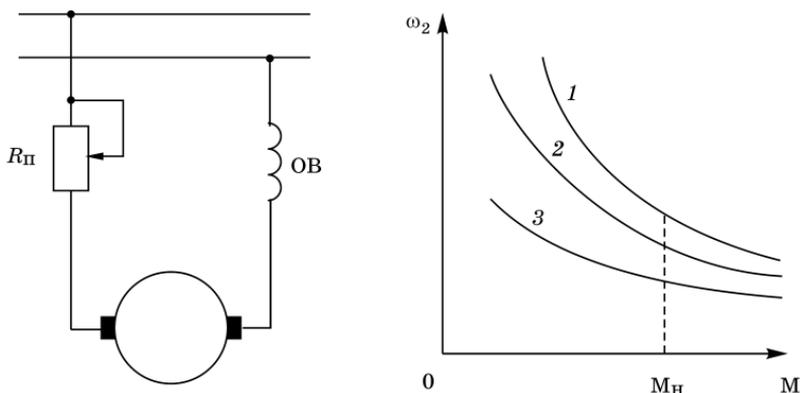


Рис. 1.35
 Схема двигателя с последовательным возбуждением
 и вид механических характеристик

У двигателя с последовательным возбуждением (рис. 1.35) ток якоря является и током возбуждения. В этом случае зависимость потока Φ от тока якоря I_a определяется магнитной характеристикой двигателя. На участке токов $0 < I_a \leq 0,9I_{aн}$ поток пропорционален току якоря (ненасыщенная магнитная система), т. е. $\Phi = c_1 I_a$, где c_1 — коэффициент пропорциональности. Вид естественной механической характеристики двигателя представлен кривой 1. Если включить добавочные сопротивления R_d , то получим искусственные механические характеристики (кривые 2 и 3):

$$\Delta\omega_2 = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M(R_a + R_d)}{c\Phi^2} = \frac{U}{cc_1 I_a} - \frac{M(R_a + R_d)}{c^2 c_1^2 I_a^2}.$$

Поскольку $M = c\Phi I_a = cc_1 I_a^2$, получаем:

$$\omega_2 = \frac{U}{cc_1 \sqrt{M/cc_1}} - \frac{R_a + R_d}{cc_1}.$$

По мере дальнейшего роста нагрузки ($I_a > 0,9I_{aн}$) магнитная система двигателя насыщается, и свойства двигателя все более приближаются к свойствам двигателя параллельного возбуждением. Однако общая зависимость $\omega_2 = f(M)$ остается близкой к гиперболической. Такую ме-

ханическую характеристику называют *мягкой*. Характер зависимости $\omega_2 = f(M)$ указывает на недопустимость холостого хода двигателя (теоретически $\omega_2 \approx \infty$ при $M \approx 0$). Двигатели с последовательным возбуждением должны иметь жесткие механические крепления с приводимыми механизмами.

Если при возможной перегрузке двигателя параллельного возбуждения частота вращения падает незначительно, а ток якоря растет пропорционально нагрузке ($I_a \equiv M$), то у двигателя с последовательным возбуждением частота вращения сильно падает, при этом ток якоря возрастает только в пропорциональности $I_a = \sqrt{M}$.

Положительные тяговые свойства двигателей с последовательным возбуждением широко используют, например, в электрифицированных транспортных средствах, в стартерах для пуска двигателей внутреннего сгорания.

Регулирование угловой скорости (частоты вращения) двигателей с последовательным возбуждением изменением потока Φ осуществляют шунтированием обмотки возбуждения или обмотки якоря (рис. 1.36). В обоих случаях токи в обмотках якоря и возбуждения не равны одному другому. Если обозначить их отношение через $k_{ш} = I_{в}/I_a$, то при шунтировании обмотки возбуждения $k_{ш} < 1$, а при шунтировании обмотки якоря $k_{ш} > 1$.

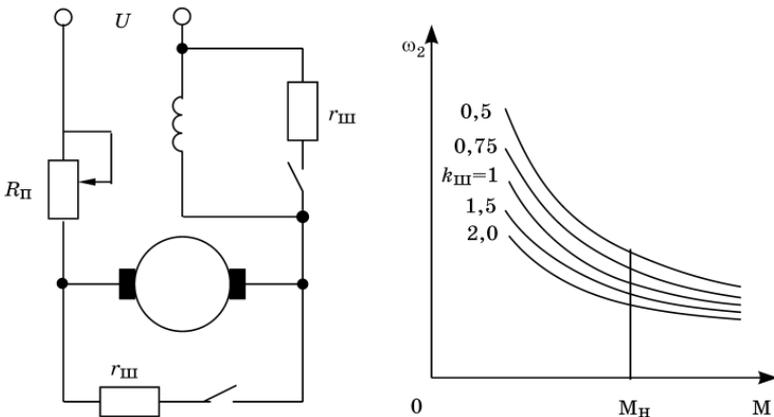


Рис. 1.36

Схема шунтирования обмоток и вид механических характеристик

1.11. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Исполнительные двигатели постоянного тока предназначены для преобразования электрического сигнала в угловое механическое перемещение вала в системах автоматики.

Несмотря на недостаток — наличие щеточно-коллекторного узла, усложняющего эксплуатацию, исполнительные двигатели постоянного тока отличаются рядом достоинств: их механические и регулировочные характеристики практически прямолинейны; способы управления просты; габариты и масса меньше, чем у асинхронных исполнительных двигателей.

Исполнительные двигатели постоянного тока выпускают с независимым электромагнитным возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов. Ими управляют со стороны якоря (рис. 1.37).

Одно из основных требований к исполнительным двигателям — быстродействие, т. е. достижение установившейся частоты вращения за минимальное время от начала подачи управляющего сигнала. Если к быстродействию не предъявляют особых требований, то в качестве исполнительных двигателей могут

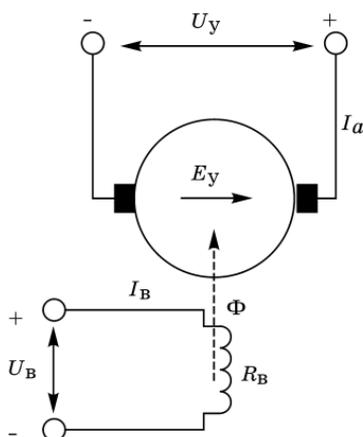


Рис. 1.37

Схема

исполнительного двигателя с якорным управлением

быть использованы двигатели постоянного тока с обычной конструкцией якоря. К числу таких двигателей относят двигатели малой мощности серий ДПМ (с постоянными магнитами) и СЛ.

Если к исполнительному двигателю предъявляют требования повышенного быстродействия, то используют малоинерционные двигатели специальной конструкции, из которых наибольшее применение получили малоинерционные двигатели с гладким, дисковым и полым якорем.

Особенность исполнительных двигателей заключается в том, что в качестве максимальных моментов M_m приняты их пусковые моменты при напряжении на обмотке управления U_y , равном напряжению на обмотке возбуждения U_b , т. е. при коэффициенте сигнала $\alpha = U_y/U_b = 1$. В этом случае относительную величину вращающего момента (в долях от максимального) $m = M/M_m$ можно представить в виде его зависимости от коэффициента сигнала α и относительной угловой скорости якоря $q = \omega_2/\omega_{20}$, $m = \alpha - q$, где ω_2 — угловая скорость якоря, $\alpha_{20} = U_y/(c\Phi)$ — угловая скорость при идеальном холостом ходе.

Если, например, при электромагнитном возбуждении поток обмотки возбуждения Φ выразить через напряжение на обмотке возбуждения $\Phi = c_\Phi U_b$, где c_Φ — коэффициент, связывающий Φ и U_b , то $\omega_{20} = U_y/(c\Phi) = U_y/(cc_\Phi U_b) = \alpha/(cc_\Phi)$. При $\alpha = 1$ $\omega_{20} = 1/(cc_\Phi)$.

Вращающий момент исполнительного двигателя с управлением со стороны якоря линейно зависит как от величины коэффициента сигнала α , так и от относительной угловой скорости якоря q . Следовательно, при различных постоянных значениях α зависимость $m = f(q)$ будет представляться семейством прямых линий (рис. 1.38).

Другой важный показатель для оценки рабочих свойств исполнительного двигателя — его регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости относи-

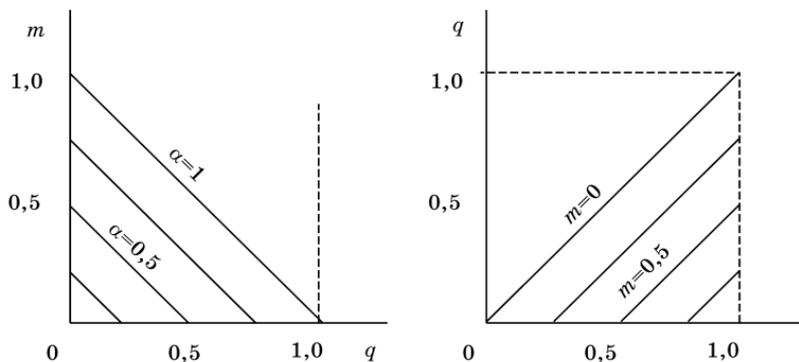


Рис. 1.38

Механические и регулировочные характеристики исполнительного двигателя постоянного тока

тельной угловой скорости якоря от коэффициента сигнала $q = f(\alpha)$ при различных постоянных значениях момента m , $q = \alpha - m$.

Полная механическая мощность двигателя в относительных единицах $P_2 = mq = \alpha q - q^2$.

При постоянном коэффициенте сигнала полная механическая мощность двигателя имеет квадратичную зависимость от относительной угловой скорости якоря. Ее максимум при угловой скорости, определяемой из условия равенства производной $dP_2/dq = 0$, т. е. при $q_m = \alpha/2$.

Максимум полной механической мощности исполнительного двигателя $P_{2m} = \alpha^2/4$.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Трансформатор представляет собой электромагнитный аппарат, преобразующий энергию переменного тока в соответствии с законом электромагнитной индукции, и предназначен для изменения электрических величин до уровней удобных для всех звеньев электрической цепи.

Трансформаторы делятся на силовые — для преобразования напряжения в электрических сетях, и на специальные — для питания потребительской сети или приемников электроэнергии, если сеть или приемники отличаются особыми условиями работы.

Силовой трансформатор состоит из двух или более обмоток, концентрически расположенных на сердечниках магнитопровода. Обмотка, к которой подводится преобразуемое напряжение, называется *первичной*, а обмотка, от которой отводится преобразованное напряжение, называется *вторичной*. Соответственно токи и напряжения на зажимах этих обмоток называются первичными и вторичными. Трансформаторы называются повышающими, если первичной является обмотка низшего напряжения (НН), и понижающими, если первичной является обмотка высшего напряжения (ВН). Ближе к стержню расположена обмотка НН.

Трансформаторы делятся на однофазные и трехфазные. На рисунке 2.1 показано принципиальное устройство однофазного трансформатора. МДС тока i_1 первичной обмотки с w_1 витками и МДС тока i_2 вторичной обмотки с w_2 витками создают основной магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу, и магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$, замыкающиеся вокруг соответствующей обмотки.

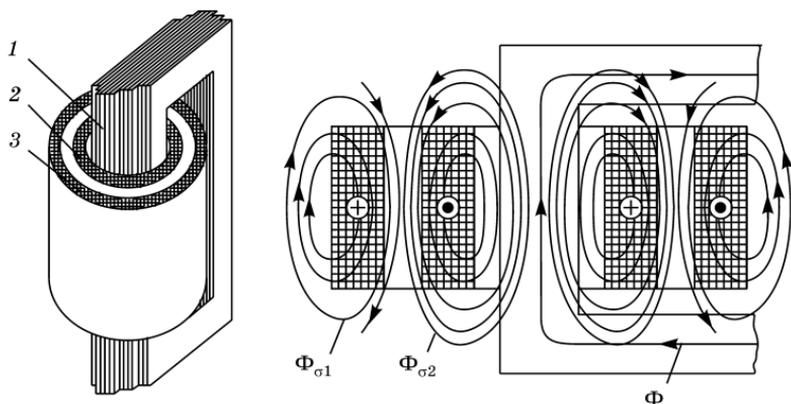


Рис. 2.1

Устройство однофазного трансформатора:

1 — магнитопровод; 2 — обмотка НН; 3 — обмотка ВН, вид основного потока и потоков рассеяния.

Синусоидальный поток $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ наводит в первичной и вторичной обмотках ЭДС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right);$$

$$e_2 = E_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Действующие значения ЭДС:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

Отношение $E_1/E_2 = w_1/w_2 = k$ называется коэффициентом трансформации трансформатора.

Потоки рассеяния определяют индуктивные сопротивления обмоток:

$$x_1 = \omega \frac{w_1 \Phi_{\sigma 1}}{i_1} = \omega L_{\sigma 1};$$

$$x_2 = \omega \frac{w_2 \Phi_{\sigma 2}}{i_2} = \omega L_{\sigma 2},$$

где $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ — индуктивности обмоток от потоков рассеяния.

Трехфазный трансформатор можно представить состоящим как бы из трех однофазных трансформаторов, три стержня которых образуют общий четвертый стержень. При трехфазных синусоидальных потоках в стержнях в общем стержне поток отсутствует ($\Sigma\Phi = 0$), и четвертый стержень становится ненужным (рис. 2.2).

Поток каждой фазы трехфазного трансформатора замыкается по верхнему и нижнему ярума магнитопровода через стержни других фаз. В магнитном отношении магнитопровод является несимметричным, так как длина магнитного пути у средней фазы меньше, чем у крайних фаз. МДС фазной обмотки среднего стержня, необходимая для проведения потока по заданному пути, также будет меньше, чем МДС других фазных обмоток, однако это различие незначительно, если учесть, что длина участков ярма, по которому проходит поток, меньше длины стержня.

Сечение стержней магнитопровода многоступенчатое, исходя из того, что на них располагают обмотки круглой формы. Для снижения индукции магнитного поля, следовательно, для уменьшения потерь в стали магнитопровода сечение ярма делают несколько большими, чем сечение стержня. Стремление уменьшить потери в стали отражается и на конструкции магнитопровода. Пластины стержней и ярма собирают в переплет — шихтуют (см. рис. 2.3), благодаря чему они не имеют сплошного стыка в плоскости поперечного сечения. Шихтовка благоприятно влияет и на прочность собранного магнитопровода.

Трехфазный стержневой трансформатор, характеризующийся простотой конструкции и доступностью обмоток

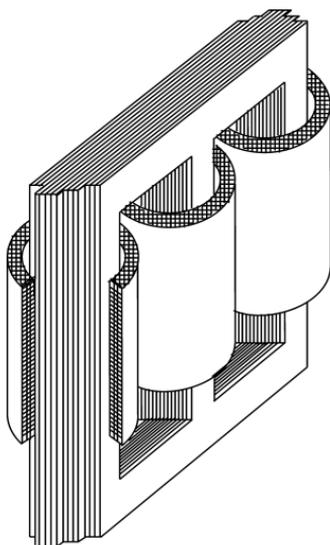


Рис. 2.2
Принципиальное устройство трехфазного трансформатора

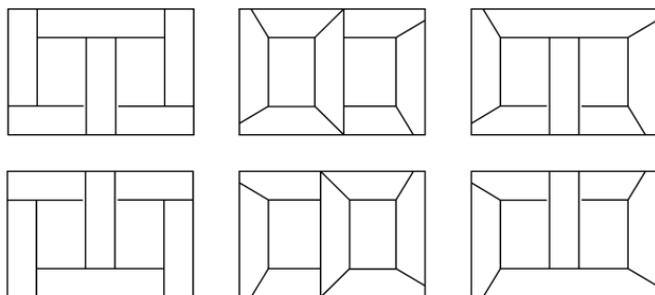


Рис. 2.3
 Схема шихтовки: с прямыми стыками;
 с косыми стыками; с комбинированными стыками

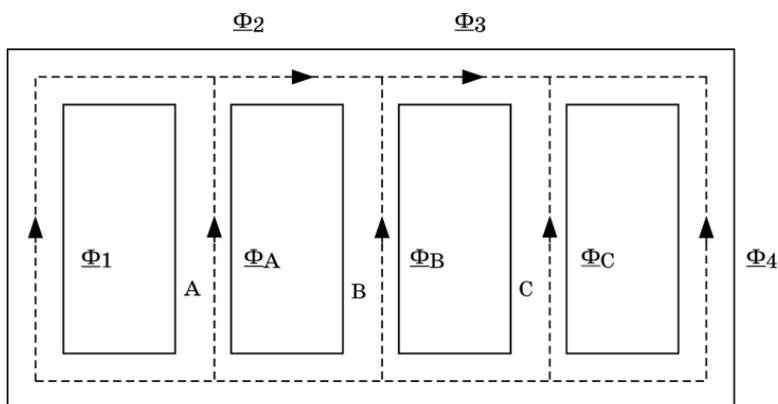


Рис. 2.4
 Вид бронестержневого магнитопровода

для осмотра и ремонта, является наиболее распространенным типом силового трансформатора.

С ростом мощности трансформаторов увеличиваются размеры, и при определенной номинальной мощности на фазу затрудняется доставка трансформаторов транспортными средствами. Снижению высоты трансформатора способствует его исполнение с бронестержневой магнитной системой, состоящей из трех внутренних стержней с обмотками трех фаз, а также из вертикальных и горизонтальных ярм (рис. 2.4).

Согласно принятым положительным направлениям потоков на рисунке 2.4: $\Phi_A = \Phi_2 - \Phi_1$; $\Phi_B = \Phi_3 - \Phi_2$; $\Phi_C =$

$= -\Phi_3 - \Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_4$, т. е. между потоками в стержнях Φ_A , Φ_B , Φ_C и потоками в ярмах Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 существуют такие же соотношения, как между линейными и фазными величинами. По абсолютной величине $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi/1,73$, где Φ — поток в стержне, и высота горизонтальных ярм уменьшается в 1,73 раза по сравнению с высотой ярм трехстержневого трансформатора.

В трансформаторах до 6300 кВА применяют и пространственные магнитопроводы, которые бывают стыковыми, когда треугольной формы ярма, намотанные из лент рулонной стали, стыкуют с тремя стержнями ступенчатой формы, а также и витыми (рис. 2.5). Витые пространственные магнитопроводы состоят из трех овальных секций, имеющих фасонную форму сечения и навитых из лент рулонной стали различной ширины. При неразъемных ленточных магнитопроводах обмотки «вматывают» непосредственно на стержни на специальных станках.

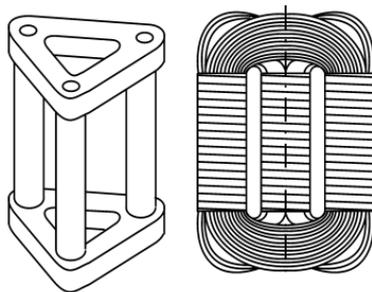


Рис. 2.5
Вид пространственных магнитопроводов

Пространственные конструкции магнитопроводов характеризуются более равномерным распределением магнитного потока и позволяют на 10–15% уменьшить потери в стали.

2.2. СТАЛЬ МАГНИТОПРОВОДОВ

При изменении магнитного поля в магнитопроводе часть энергии трансформатора преобразуется в теплоту. Мощность, соответствующая этой части энергии, называется *потерями в стали*. Потери в стали состоят из потерь от гистерезиса, которые вызываются процессами в стали при перемене ориентации областей самопроизвольного намагничивания, и потерь от вихревых токов, вызываемых вихревыми ЭДС, наводимыми в толще листа стали изменяющимся во времени магнитным потоком.

Потери от гистерезиса пропорциональны частоте перемагничивания и квадрату индукции магнитного поля. Кроме того, они зависят и от сорта материала. В свою очередь, потери от вихревых токов также зависят от марки стали, пропорциональны квадрату частоты перемагничивания, квадрату амплитуды индукции магнитного поля и квадрату толщины листа — составной части магнитопровода.

Одно из требований, предъявляемых к правильно сконструированному трансформатору, — это получение возможно меньших потерь в стали при максимальном использовании активных материалов. Поэтому на всем протяжении трансформаторостроения шел поиск снижения потерь за счет применения более качественной стали.

Для изготовления магнитопроводов трансформаторов промышленность выпускает тонколистовую холоднокатаную электротехническую изотропную (с одинаковыми магнитными свойствами при намагничивании по различным направлениям в плоскости листа) сталь марок 3411–3418 с повышенным содержанием кремния (ГОСТ 21427.1-83). Кремний способствует обезуглероживанию стали, что приводит к увеличению магнитной проницаемости, а также снижает потери от гистерезиса и увеличивает удельное электрическое сопротивление стали. Увеличение удельного электрического сопротивления позволяет уменьшить потери в стали от вихревых токов. Кроме того, кремний ослабляет старение стали (увеличение потерь с течением времени), уменьшает ее магнитострикцию (изменение формы и размеров при намагничивании), следовательно, магнитный шум трансформаторов. Холоднокатаная электротехническая сталь допускает магнитную индукцию в магнитопровode до 1,7 Тл.

Первая цифра в обозначении марки стали указывает на структурное состояние стали (холоднокатаная изотропная), вторая — на содержание кремния (от 2,8 до 3,8%), третья — на удельные потери при определенной индукции и частоте перемагничивания 50 Гц (0 — при индукции 1,7 Тл, 1 — при индукции 1,5 Тл), четвертая — на порядковый номер стали. Возрастающий номер характеризует улучшение магнитного свойства трансформаторной стали.

Пластины электротехнической стали, предназначенные для сборки магнитопровода, изолируют одну от другой лаковой пленкой или жаростойкими покрытиями, которые наносят на металлургических заводах после проката.

Удельные потери для основных применяемых в силовых трансформаторах марок стали 3411–3413 с толщиной листа 0,35 мм при индукции 1,0; 1,5 и 1,7 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц приведены в таблице 2.1. По кривой намагничивания на рисунке 2.6 можно судить об абсолютной и относительной проницаемости, например автотрансформаторной стали 3413.

Таблица 2.1

Удельные потери в электротехнической стали толщиной 0,35 мм

Марка стали	Удельные потери, Вт/кг		
	$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$
3411	0,8	1,75	2,5
3412	0,7	1,5	2,2
3413	0,6	1,3	1,9

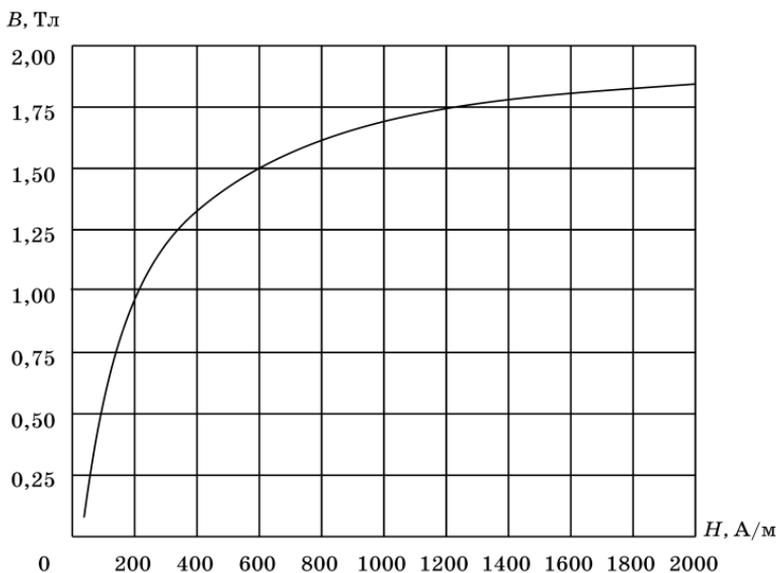


Рис. 2.6

Кривая намагничивания трансформаторной стали

2.3. ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Тип обмоток увязывают с электромагнитными и тепловыми характеристиками конструируемого трансформатора. Элементом обмотки является виток, сечение которого выбирают в зависимости от номинального тока. При малых токах применяют провода круглого сечения, при больших токах — прямоугольного сечения. Витки обмотки группируют в катушки, образующие обмотку в целом. В зависимости от намотки катушки могут быть цилиндрической формы, когда каждый следующий виток укладывается рядом с предыдущим, и плоской формы в виде диска, когда каждый следующий виток укладывают поверх предыдущего. Обмотки из цилиндрических катушек называются *цилиндрическими обмотками*, а состоящие из дисковых катушек — *дисковыми обмотками*.

Существуют два направления (способа) намотки обмоток — левое и правое. Направление намотки однослойной обмотки принято считать левым, если уклон ее витков совпадает с левой резьбой винта, и правым, если уклон витков совпадает с правой резьбой винта (рис. 2.7). У многослойных обмоток о направлении намотки судят по первому слою. При отсутствии особых требований обмотки выполняют *только с левым направлением намотки*.

Однослойные и двухслойные цилиндрические обмотки, витки которых состоят из нескольких параллельных про-

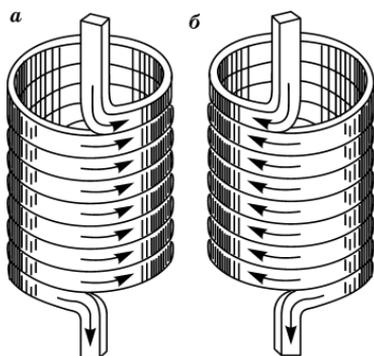


Рис. 2.7
Левый (а) и правый (б)
способы намотки
цилиндрической обмотки

водников прямоугольного сечения, применяют в качестве обмоток НН на номинальный ток до 800 А. В двухслойной обмотке между слоями устраивают охлаждающий канал (рис. 2.8). Многослойные цилиндрические обмотки применяют в качестве обмоток ВН напряжением до 35 кВ. Охлаждающий канал устраивают после намотки приблизительно третьей части от общего числа слоев.

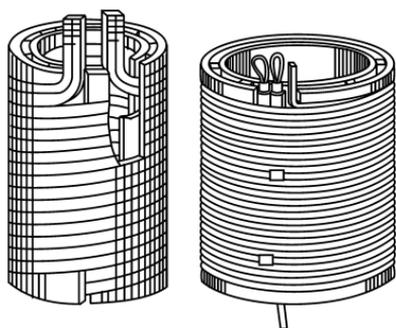


Рис. 2.8
Двухслойная и многослойная
цилиндрические обмотки

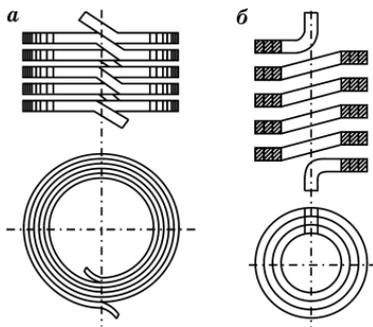


Рис. 2.9
Непрерывная дисковая (а)
и винтовая (б) обмотки

Если многослойную цилиндрическую обмотку разбить в осевом направлении на несколько последовательно соединенных катушек, устраивая между ними каналы охлаждения, то получают многослойную катушечную обмотку, которую применяют в трансформаторах до 1000 кВА с высшим напряжением 10 и 35 кВ.

В крупных трансформаторах на напряжение до 35 кВ и выше применяют непрерывные дисковые (спиральные) обмотки, состоящие из дисковых катушек (рис. 2.9а). Винтовые обмотки (рис. 2.9б) применяют при малом числе витков и больших токах, т. е. как обмотки НН крупных трансформаторов. По принципу намотки они похожи на слоевую обмотку, витки которой состоят из нескольких параллельно включенных проводов прямоугольного сечения. Отличие состоит в том, что в слоевой обмотке параллельные провода укладывают рядом, а в винтовой обмотке — один на другой. Кроме того, между отдельными витками в винтовой обмотке имеются каналы охлаждения. Непрерывные дисковые и винтовые обмотки отличаются от слоевых обмоток большей механической прочностью в осевом направлении.

Расположенные в радиальном направлении проводники винтовой обмотки имеют неодинаковую длину и находятся в поле рассеяния разной индукции. Если не выполнять транспозицию проводников витка — перекладывание по отдельности или группами, то активные и индуктивные

сопротивления каждого из параллельных проводов будут различными, что приведет к неравномерному распределению тока по проводникам. Транспозиция проводников витка исключает неравномерное распределение тока.

Проводниковые материалы, применяемые в трансформаторах, изготавливают из электротехнической меди и алюминия. Электротехническая медь, получаемая электролизом, отличается высокой чистотой и хорошим качеством. Она имеет низкое удельное электрическое сопротивление $0,0175$ мкОм·м при 20°C (плотность $8,96$ г/см³ при 20°C). Алюминий уступает меди по электропроводности и механической прочности. Его удельное электрическое сопротивление в $1,65$ раза больше удельного сопротивления меди. Однако низкая стоимость, малая плотность ($2,7$ г/см³) и сравнительно низкое электрическое сопротивление позволяют использовать его для изготовления проводов, применяемых в обмотках силовых трансформаторов начальных габаритов.

Для обмоток трансформаторов применяют медные провода (первая буква в обозначении П) и алюминиевые провода (первые буквы в обозначении АП) марок ПБ, ПБУ, ПБД, ПЭЛ, ПСД, АПБ, АПБУ, АПБД и др. В обозначении проводов: Б — провод, изолированный лентами кабельной или телефонной бумаги, БУ — провод, изолированный лентами высоковольтной кабельной уплотненной бумаги, БД — провод, изолированный двумя слоями нитей из хлопчатобумажной пряжи, ЭЛ — эмалированный ласточкой провод, СД — провод, изолированный двумя слоями стекловолкна, пропитанного лаком.

Для изготовления отводов и ответвлений обмоток применяют гибкие провода с медной жилой круглого сечения марок ПБОТ, медные и алюминиевые шины и прутки. Жила провода марки ПБОТ состоит из тонких медных проволок, изолирована большим количеством слоев кабельной бумаги. В зависимости от толщины бумажной изоляции эти провода маркируют ПБОТ-3, ПБОТ-6 и ПБОТ-8 (цифры в обозначении марок проводов указывают толщину изоляции на одну сторону) и выпускают сечением $16, 25, 50, 70, 95, 120, 150, 240, 300, 400$ мм² и более. Для улучшения

качества обмоток и облегчения работ при их намотке с большим числом проводов в витке применяют подразделенные провода ПБП.

Электроизоляционные материалы обмоток и других токоведущих частей трансформатора должны обладать большим удельным объемным и поверхностным сопротивлением, достаточной электрической прочностью, характеризоваться малыми диэлектрическими потерями. Все это должно сочетаться с рядом других свойств, обеспечивающих их длительную работу, — нагревостойкостью, механической прочностью, эластичностью, масло- и влагостойкостью.

Большинство изоляционных материалов, применяемых в трансформаторах, относятся к классу нагревостойкости А с предельно допустимой температурой нагрева 105°C. Это волокнистые материалы из хлопка или натурального и искусственного шелка, пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик, электроизоляционные бумаги, электрокартон, электроизоляционные лаки, изоляционные ленты, электротехнический гетинакс и текстолит, стеклотекстолит, бумажно-бакелитовые изделия, фарфор, другие материалы.

К электроизоляционным материалам относят и трансформаторное масло. Электрическая прочность изоляционных материалов, погруженных в масло, возрастает, а увеличение коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене позволяет повысить электромагнитные нагрузки, следовательно, и увеличить мощность трансформатора.

Работа трансформатора сопровождается старением изоляционных материалов — потерей механической прочности. Старение тем интенсивнее, чем выше нагрев частей

Таблица 2.2

Допустимые превышения температуры частей трансформатора

Части трансформатора	Превышение температуры, °С
Обмотки	65
Поверхность магнитопровода	75
Масло в верхних слоях	60

трансформатора. Таким образом, срок службы трансформатора определяет, прежде всего, срок службы изоляции, исходя из которого, определяют допустимое превышение температуры отдельных частей трансформатора над температурой окружающей среды (табл. 2.2, естественно изменяющаяся температура окружающего воздуха не более 40°C).

2.4. СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Магнитопровод с обмотками и крепежными деталями образует активную часть силового трансформатора, которую помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом (рис. 2.10). На крышке бака установлены: выводы высшего и низшего напряжения; маслорасширитель с указателем уровня масла и воздухоосушителем для очистки от влаги и загрязнений воздуха, поступающего в трансформатор при температурных колебаниях уровня масла; термосифонный фильтр для непрерывной автоматической регенерации масла; выхлопная труба и газовое реле. На крышку бака выведено переключающее устройство регулировочных зажимов обмотки высшего напряжения, что при необходимости позволяет изменять коэффициент трансформации трансформатора. В нижней части бака расположены заземляющий болт, пробка для взятия пробы и спуска масла, а на дне бака находится пробка для слива остатков масла.

Объем масла, заливаемого в трансформатор, выбирают таким, чтобы при колебаниях температуры окружающей среды или при изменении режима нагрузки открытая поверхность масла оставалась в пределах маслорасширителя. В этом случае продукты разложения масла почти не попадают в основной бак, а скапливаются на дне маслорасширителя, откуда их можно удалять через специальное отверстие.

Трансформаторное масло — горючее вещество, поэтому масляные трансформаторы являются взрывоопасными и пожароопасными. При внутренних повреждениях изоляции в трансформаторе возможны чрезмерный нагрев

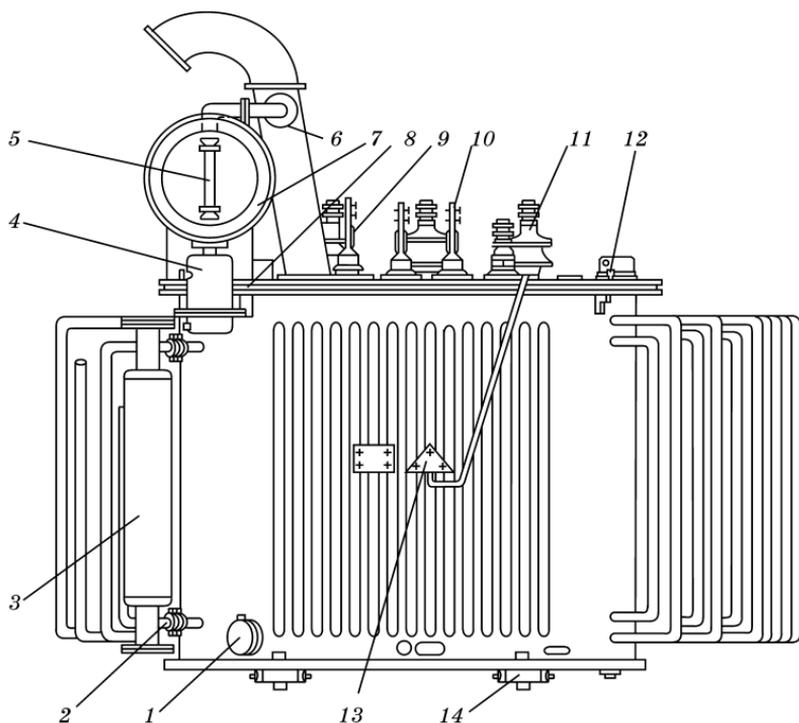


Рис. 2.10

Вид силового трансформатора:

1 — кран слива масла; 2, 3 — кран и корпус термосифонного фильтра; 4 — воздухоосушитель; 5 — маслоуказатель; 6 — выхлопная труба; 7 — расширитель; 8 — крышка бака; 9–11 — выводы обмоток ВН, НН и нулевой точки; 12 — привод переключателя напряжения; 13 — электротермометр; 14 — каток.

и испарение масла, сопровождающиеся выделением газов. Для предотвращения разрушения бака при резком повышении давления внутри него на крышке бака предусмотрена выхлопная труба, закрытая стеклянной мембраной, которая лопаается при превышении давления внутри бака.

Газовое реле служит для защиты трансформатора от внутренних повреждений, сопровождающихся выделением газа. Его устанавливают в трубопроводе между маслорасширителем и основным баком. Внутри корпуса реле расположены два поплавка с закрепленными на них ртутными стеклянными переключателями. В нормальном состоянии реле заполнено маслом, поплавки находятся

в верхнем положении и контакты переключателя не замкнуты. При внутренних повреждениях трансформатора газ в баке поднимается вверх, попадает в реле и вытесняет из него масло, в результате чего один из поплавков опускается и замыкает контакты звуковой сигнализации. При значительных внутренних повреждениях и сильной струе масла, образуемой бурным выделением газа, другой поплавок отбрасывается в направлении движения масла и замыкает контакты цепи отключения трансформатора.

Воздухоосушитель представляет собой наполненный сорбентом — мелкопористым гранулированным силикагелем металлический цилиндр, имеющий масляный затвор. **Силикагель** — силикатный минерал в виде стекловидных или стекловидноматовых зерен, обладает большой пористостью и способностью задерживать влагу и мельчайшие смолообразующие вещества. При понижении уровня масла в расширителе воздух, засасываемый в трансформатор, проходит через масляный затвор, очищаясь от посторонних примесей, а затем через слой силикагеля, осушающего воздух. При повышении уровня масла в расширителе воздух проходит путь в обратном направлении. По состоянию индикаторного силикагеля, находящегося на колпаке из органического стекла, судят о качестве работы воздухоосушителя. Термосифонный фильтр заполняют гранулированным крупнопористым силикагелем, который отбирает из масла влагу, кислоты и перекисные соединения,



Рис. 2.11
Превышение температуры
участков трансформатора

образующиеся в процессе старения масла и твердой изоляции трансформатора.

При работе трансформатора выделяющееся в активной части тепло передается маслу, которое циркулирует и отдает тепло стенкам бака, от которых оно рассеивается в окружающем воздухе. Анализ данных о превышении температуры отдельных участков поперечного сече-

ния трансформатора над температурой окружающей среды показывает, что перепад температур внутри магнитопровода, обмоток, масла и бака незначителен, и они могут рассматриваться в тепловом отношении как однородные тела. Значительные перепады температур наблюдаются лишь на участках от нагретых обмоток и магнитопровода — основных генераторов тепла — к маслу и от стенок бака к окружающей среде (рис. 2.11).

С момента включения трансформатор начинает нагреваться. Для каждой из его частей, а также и для трансформатора в целом, учитывая, что на участок от стенок бака к окружающему воздуху приходится около 70% общего перепада температур, процесс нагревания может быть выражен дифференциальным уравнением нагрева однородного твердого тела массой m :

$$Pdt = sktdt + mcd\tau, \quad (2.1)$$

где P — количество тепла, генерируемого в единицу времени; s — охлаждаемая поверхность; k — коэффициент теплоотдачи — количество тепла, отдаваемое в единицу времени с единицы поверхности в окружающую среду при разности температур тела и среды 1°C ; τ — изменяющееся превышение температуры тела над температурой окружающей среды; c — удельная теплоемкость тела; t — время.

Как только температура отдельных частей трансформатора станет выше температуры окружающей среды, тепло начнет передаваться среде, повышение температуры частей будет замедляться и, в конце концов, наступит установившееся тепловое состояние ($\tau = \tau_{\text{уст}}$). Для этого состояния $P = sk\tau_{\text{уст}}$, откуда $\tau_{\text{уст}} = P/sk$. Таким образом, установившееся превышение температуры пропорционально количеству выделенного тепла и обратно пропорционально условиям охлаждения.

Если предположить, что с момента включения трансформатора тепло, выделяющееся в отдельных его частях, идет только на нагревание этих частей, то уравнение (2.1) переписется в виде

$$Pdt = mcd\tau.$$

В этом случае генерирующий тепло трансформатор (если рассматривать его как однородное тело) достигнет установившегося превышения температуры за некоторое время T , следовательно,

$$PT = mc\tau_{\text{уст}}. \quad (2.2)$$

Время $T = mc\tau_{\text{уст}}/P$ называется постоянной времени нагрева.

Подставляя в уравнение (2.1) значение P из (2.2) и деля обе части уравнения на mc , получаем:

$$\tau_{\text{уст}} = \frac{dt}{T} = \frac{sk}{mc} \cdot \tau dt + dt.$$

Учитывая, что $sk/mc = 1/T$, находим

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\tau}{\tau_{\text{уст}} - \tau}.$$

Интегрируя последнее выражение, имеем

$$\frac{t}{T} = -\ln(\tau_{\text{уст}} - \tau) + C. \quad (2.3)$$

Если при включении трансформатора ($t = 0$) превышение температуры над температурой окружающей среды составляло τ_0 , то

$$C = \ln(\tau_{\text{уст}} - \tau_0).$$

Подставляя произвольную постоянную C в (2.3), получаем

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\tau_{\text{уст}} - \tau_0}{\tau_{\text{уст}} - \tau},$$

откуда находим зависимость $\tau = f(t)$ в виде

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}. \quad (2.4)$$

В частности, если при $t = 0$ $\tau_0 = 0$, то

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (2.5)$$

Согласно последним уравнениям, установившееся превышение температуры теоретически достигается за $t = 4,6T$, поскольку

$$1 - e^{-4,6} \approx 0,99.$$

Аналогичным образом происходит и охлаждение трансформатора (рис. 2.12). Если при отключении имело место превышение температуры τ_0 , то процесс охлаждения до $\tau_{уст} = 0$ описывается уравнением

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

Чтобы нагрев трансформатора не превышал допустимых значений, опытным путем установлено, что удельная тепловая нагрузка поверхности бака масляного трансформатора не должна превышать 570 Вт/м^2 . Подобное значение удельной тепловой нагрузки получается у трансформаторов до 40 кВА, которые имеют баки с гладкими поверхностями.

Для трансформатора мощностью выше 40 кВА увеличивают теплоотдающие поверхности баков. Это объясняется тем, что потери в активной части трансформатора растут пропорционально массе его активных материалов, следовательно, пропорционально кубу линейных размеров. В то же самое время поверхность бака увеличивает пропорционально квадрату линейных размеров. Таким образом, рост потерь в геометрически подобных трансформаторах превышает рост охлаждающей поверхности бака. С целью предотвращения перегрева в трансформаторах до 1600 кВА увеличение поверхности охлаждения достигается путем применения ребристых и трубчатых

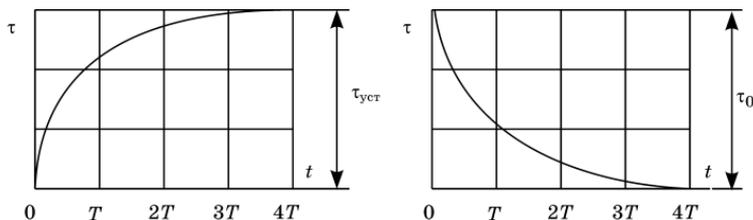


Рис. 2.12
Кривые нагрева и охлаждения трансформатора

Таблица 2.3

Виды систем охлаждения трансформаторов

Вид системы охлаждения трансформатора	Обозначение
Масляные трансформаторы	
Естественная циркуляция воздуха и масла	М
Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	Д
Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла	МЦ
Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла	НМЦ
Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла	ДЦ
Принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла	НДЦ
Принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла	Ц
Принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла	НЦ
Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком	
Естественное охлаждение	Н
Охлаждение с принудительной циркуляцией воздуха	НД
Охлаждение с принудительной циркуляцией воздуха и с направленным потоком жидкого диэлектрика	ННД
Сухие трансформаторы	
Естественное воздушное при открытом исполнении	С
Естественное воздушное при защищенном исполнении	СЗ
Естественное воздушное при герметичном исполнении	СГ
Воздушное с принудительной циркуляцией воздуха	СД

радиаторов, а в более мощных трансформаторах — с обдувом радиаторов вентиляторами.

В отдельных трансформаторах изолирующей средой служит синтетический негорючий жидкий диэлектрик с практически такими же изоляционными свойствами и теплопроводностью, что и трансформаторное масло. Синтетический диэлектрик дороже масла, токсичен и требует более тщательной герметизации систем охлаждения.

Трансформаторы до 1600 кВА могут изготавливаться и сухими. Обозначения систем охлаждения приведены в таблице 2.3.

2.5. СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

Каждая обмотка трехфазного трансформатора может быть соединена в звезду Y , треугольник D и зигзаг Z , а с введенной нулевой точкой (нейтралью N) соответственно в Y_N и Z_N (рис. 2.13–2.15).

Схемы Y/Y_N и Y/Z_N применяют в трансформаторах, питающих силовую и осветительную нагрузку, схему Y/D применяют для питания силовой нагрузки при большем

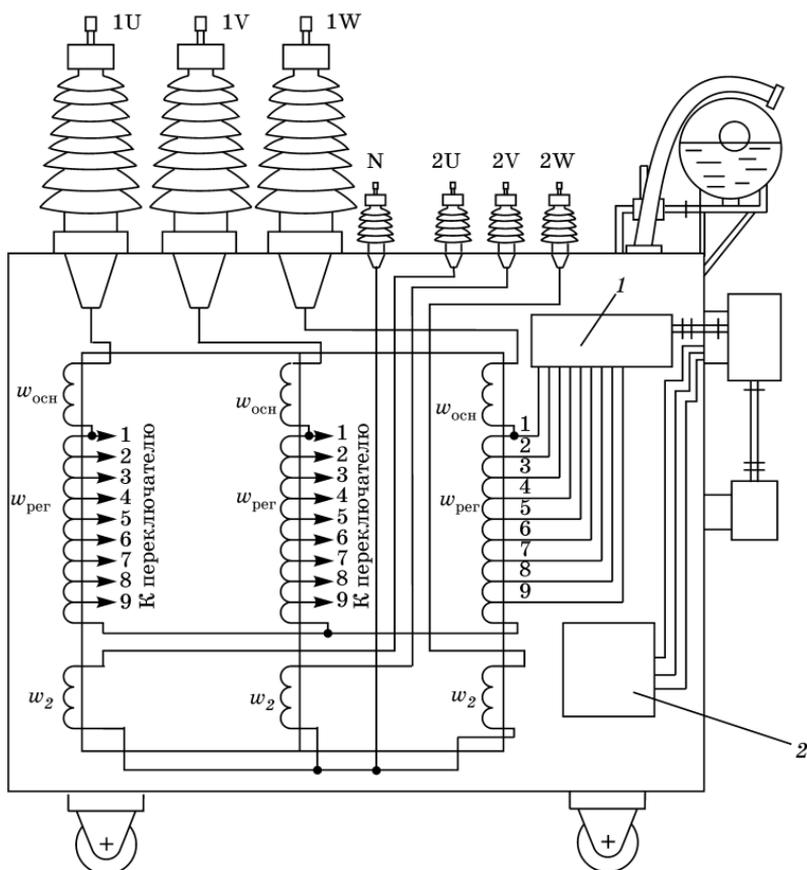


Рис. 2.13

Схема соединения обмоток Y/Y_N :

1 и 2 — устройство РПН; $w_{осн}$ и $w_{рег}$ — основная и регулировочная часть обмотки ВН; w_2 — обмотка НН.

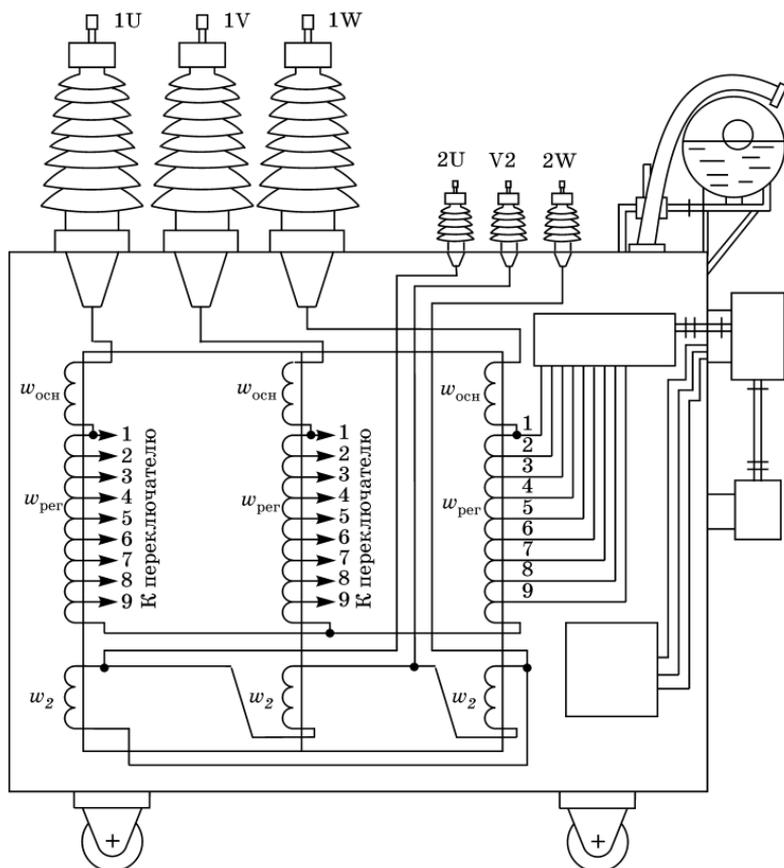


Рис. 2.14
Схема соединения обмоток У/Д

диапазоне мощности и напряжений, чем схема $У/У_n$. Схему $Д/У_n$ применяют в трансформаторах, установленных на обоих концах высоковольтных линий электропередач, при этом обмотка ВН соединяется $У_n$.

У трансформаторов со схемой $У/Z_n$ при несимметричной нагрузке значительно меньше нарушается симметрия фазных вторичных напряжений, чем у трансформаторов со схемой $У/У_n$. Недостаток схемы $У/Z_n$ связан с тем, что для получения одинакового со схемой $У/У_n$ фазного вторичного напряжения необходимо в $2/1,73$ раза увеличить число витков вторичной обмотки. Увеличенное число вит-

ков и размещение на одном стержне частей обмоток с разными по фазе токами, приводит к росту потока рассеяния, следовательно, и индуктивного сопротивления обмотки.

В трансформаторах предусмотрены две схемы регулирования напряжения изменением коэффициента трансформации — без возбуждения (ПВВ) и под нагрузкой

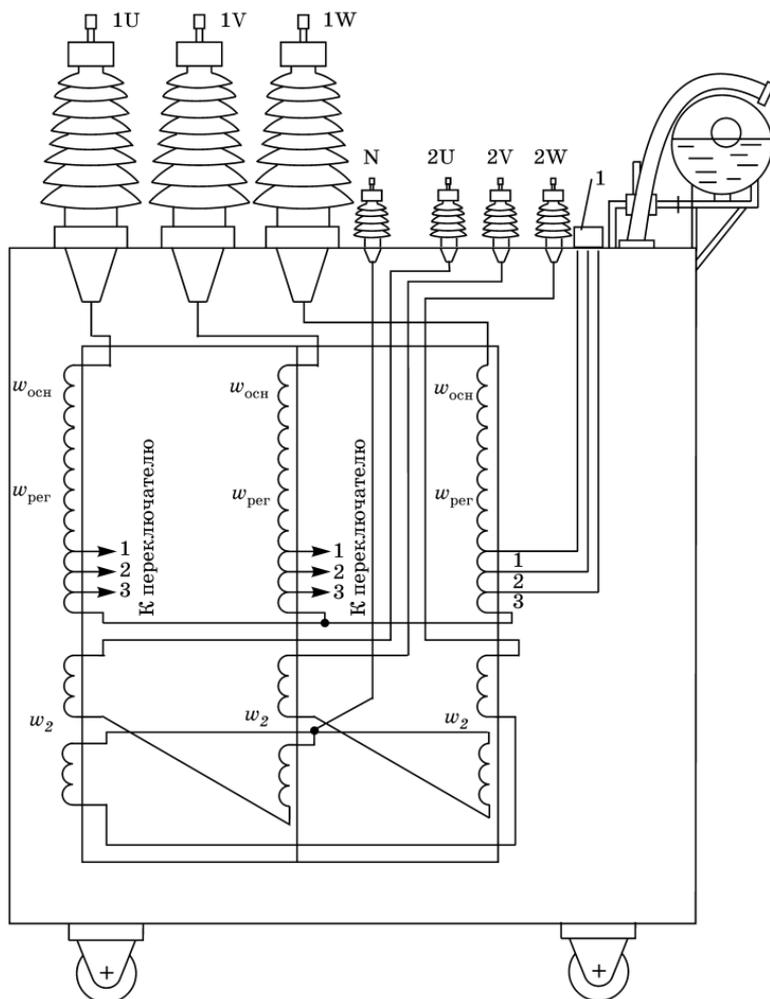


Рис. 2.15
Схема соединения обмоток Y/Z_n :

1 — устройство ПВВ.

(РПН). Ответвления выполняют от наружной обмотки ВН, у которой больше количество витков, что повышает точность регулирования. При наибольшем первичном напряжении включены все витки обмотки. При понижении напряжения часть витков отключается. В этом случае поток $\Phi \equiv U_1/w_1$, следовательно, напряжение на обмотке НН практически остается неизменным по величине.

В схеме ПБВ переключатель на три (+5; 0; -5%) или пять положений (+5; +2,5; 0; -2,5; -5%) от U_n размещают в баке под крышкой трансформатора, на которую выводят рукоятку с указателем положения. Регулирование напряжения осуществляют при отключении трансформатора от сети, что является недостатком схемы. Схему используют в основном для коррекции напряжения трансформаторов небольшой мощности при сезонных нагрузках.

Схема РПН позволяет изменять коэффициент трансформации в пределах от ± 10 до $\pm 16\%$. Управление может быть как ручным, так и автоматическим. В трансформаторах до 6300 кВА применяют быстродействующие переключатели (контакторы) с малогабаритными активными токоограничивающими сопротивлениями и износостойкой контактной системой (рис. 2.16).

Предположим, что требуется перевести рабочий ток ответвления x_2 на ответвление x_3 . В первоначальном положении ток проходит через подвижный контакт Π_2 и контакты 3 и 4 переключателя Π . При переключении в первую очередь движется обесточенный контакт Π_1 на ответвление x_3 , а затем под воздействием мощных пружин переключатель Π быстро переводится в положение, в котором он присоединяется к контактам 1 и 2.

В промежуточном положении, когда переключателем Π замкнуты контакты 4 и 1, под воздействием

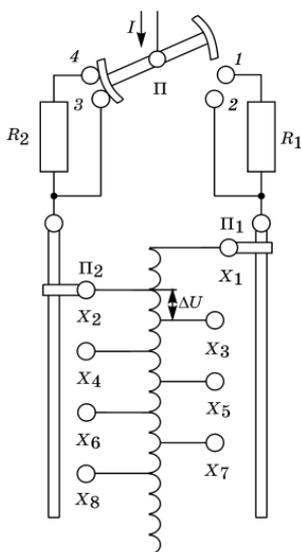


Рис. 2.16
Схема РПН

напряжения ΔU в короткозамкнутой цепи помимо рабочего тока потечет ток короткого замыкания, ограниченный до безопасной величины последовательно включенными сопротивлениями R_1 и R_2 . Наряду с активными токоограничивающими сопротивлениями используют и системы РПН с токоограничивающими индуктивностями (реакторами).

Одним из условий параллельной работы трехфазных трансформаторов, к которым подводится единое напряжение, является совпадение их вторичных линейных ЭДС, что возможно при одинаковых коэффициентах трансформации и одинаковом сдвиге линейных ЭДС вторичной и первичной обмоток в каждом трансформаторе. Судить о сдвиге линейных ЭДС обмоток ВН и НН позволяет понятие о группе соединения обмоток трансформатора.

Группой соединения обмоток называется угловое смещение векторов линейных ЭДС обмотки НН по отношению к векторам соответствующих линейных ЭДС обмотки ВН. Это угловое смещение обозначается числом, которое при умножении на 30° дает угол расхождения векторов линейных ЭДС в градусах. В схемах обмоток трехфазного

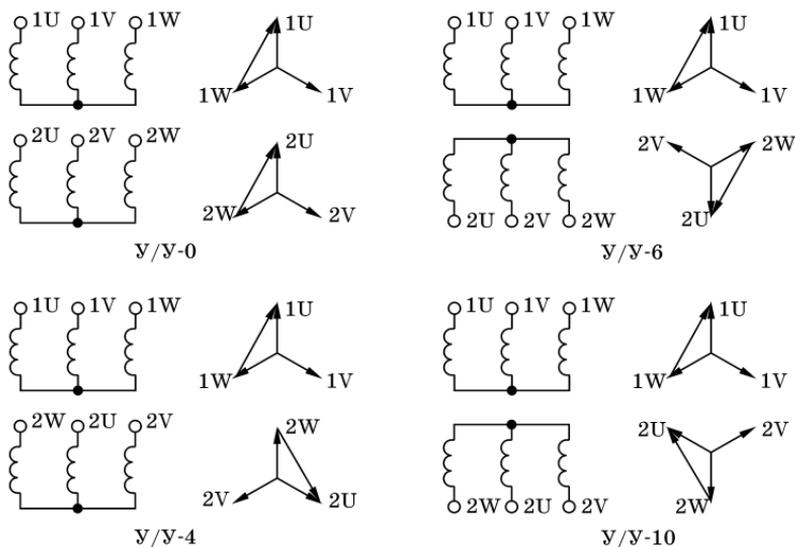


Рис. 2.17

Варианты групп соединения обмоток трансформатора

трансформатора углы между векторами ЭДС кратны 30° , и угол 30° принят за угловую единицу.

Рассмотрим, например, схему соединения обмоток трехфазного трансформатора Y/Y (см. рис. 2.17). Примем за положительное графическое направление ЭДС в фазных обмотках направление от конца к началу. При совпадении графических положительных направлений ЭДС группа соединения $Y/Y-0$. Если зажимы вторичной обмотки маркированы противоположно тому, то группа соеди-

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжения холостого хода		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				Y/Y_0-0
				$Y_N/Y-0$
				$Y/D-11$
				$Y_N/D-11$
				Y/Z_N-11
				D/Y_N-11
				$D/D-0$

Рис. 2.18

Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

нения У/У-6. При произвольной маркировке зажимов вторичной обмотки получим, например, У/У-4 и У/У-10.

Всего возможно 12 вариантов групп соединения обмоток. Нулевая и четные группы 0, 2, 4, 6, 8, 10 будут в тех случаях, когда схемы соединения обмоток одинаковы, и нечетные группы 1, 3, 5, 7, 9, 11 — когда схемы соединений различны.

ГОСТ 11677 предусматривает изготовление силовых трансформаторов только с группами соединения обмоток 0 и 11 (рис. 2.18). Соединение вторичной обмотки в zigzag с нулевым проводом (Z_n) при $U_{2n} = 0,4$ кВ применяют в трансформаторах, как правило, мощностью 25–250 кВА.

2.6. ПАРАМЕТРЫ И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

При симметричной нагрузке трехфазного трансформатора процессы в каждой фазе протекают одинаково лишь с временным сдвигом на треть периода напряжения, следовательно, при анализе процессов и при определении параметров можно ограничиться одной фазой или однофазным трансформатором.

Рассмотрим параметры трансформатора. При длине линии магнитного потока l_c , воздушном зазоре при шихтовке δ и сечении магнитопровода S_c магнитное сопротивление основному потоку

$$R_{\mu A} = \frac{l_c}{\mu_0 \mu S_c} + \frac{\delta}{\mu_0 S_c},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость стали при определенной индукции.

Сопротивление взаимоиנדукции и коэффициент взаимоиנדукции:

$$x_{\mu} = \omega M = \omega \frac{\Phi w_1}{i_1} = \omega \frac{\frac{i_1 w_1}{R_{\mu c}} \cdot w_1}{i_1} = \omega \frac{w_1^2}{R_{\mu c}};$$

$$M = \frac{w_1^2}{R_{\mu c}}.$$

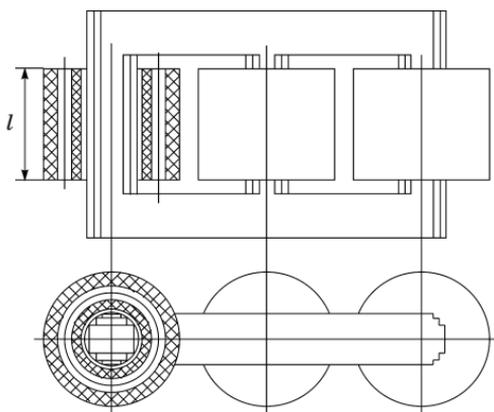


Рис. 2.19
Вид воздушного канала между обмотками

Магнитное сопротивление потокам рассеяния $R_{\mu\sigma}$ сосредоточено в основном в канале между обмотками (рис. 2.19).

При расчете $R_{\mu\sigma}$ картину потоков рассеяния заменяют на эквивалентную плоскопараллельную картину в воздушном канале, вводя поправочный коэффициент (коэффициент Роговского) $k_p \approx 0,94-0,97$ к длине канала l :

$$R_{\mu\sigma} = \frac{lk_p}{\mu_0 Q},$$

где Q — площадь воздушного канала.

Индуктивное сопротивление обмоток:

$$x_1 = \omega L_{\sigma 1} = \omega \frac{w_1 \Phi_{\sigma 1}}{i_1} = \omega \frac{w_1 i_1 w_1}{i_1 R_{\mu\sigma}} = \omega \frac{w_1^2}{R_{\mu\sigma}};$$

$$x_2 = \omega L_{\sigma 2} = \omega \frac{w_2 \Phi_{\sigma 2}}{i_2} = \omega \frac{w_2 i_2 w_2}{i_2 R_{\mu\sigma}} = \omega \frac{w_2^2}{R_{\mu\sigma}}.$$

Согласно соотношению $x_1/x_2 = (w_1/w_2)^2 = k^2$ приведенное к первичной обмотке индуктивное сопротивление вторичной обмотки $x_2' = x_2 k^2 = x_1$.

Обмотки трансформаторов выполняют, как правило, из одного проводникового материала, а сечения проводов S

выбирают из условия одинаковой плотности тока. Принимая длину витка обмоток $l_{в1} \approx l_{в2}$, соотношение активных сопротивлений $R_1/R_2 = w_1 S_2 / w_2 S_1 = k^2$, и приведенное активное сопротивление вторичной обмотки $R'_2 = R_2 k^2 = R_1$.

Приведенные ЭДС и напряжение вторичной обмотки $E'_2 = E_2 k$ и $U'_2 = U_2 k$, а из условия одинаковой мощности вторичной обмотки приведенный ток вторичной обмотки $I'_2 = I_2 / k$. Схема приведенного трансформатора показана на рисунке 2.20.

На схеме приведенного трансформатора точки равного потенциала c и c' , а также d и d' можно объединить, и приведенный трансформатор можно представить в виде его схемы замещения (рис. 2.21).

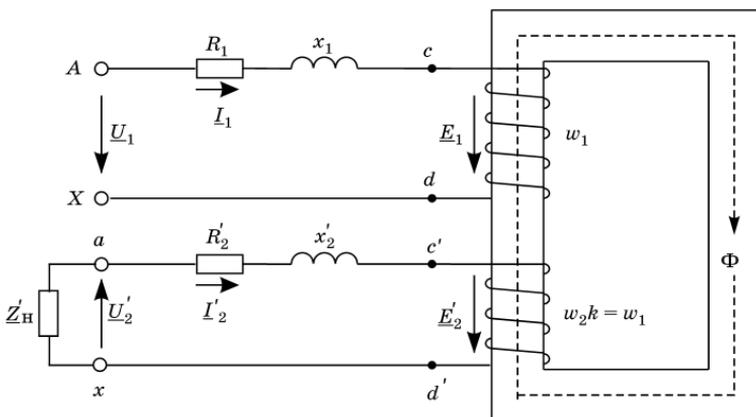


Рис. 2.20

Схема приведенного трансформатора

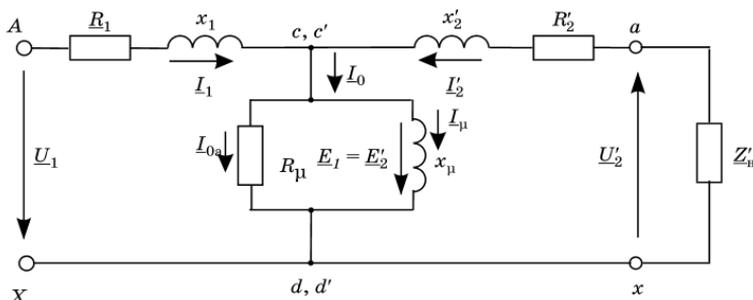


Рис. 2.21

Схема замещения трансформатора

На рисунке 2.21 $I_0 = I_1 + I'_2$ при $I'_2 = 0$ — ток холостого хода трансформатора. Его составляющая — намагничивающий ток I_μ определяет основной поток, а составляющая I_{0a} отображает потери в стали $I_{0a}^2 R_\mu$, где R_μ — условное активное сопротивление, вводимое в схему замещения для отображения потерь в стали.

Схеме замещения отвечают векторные уравнения:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_1 R_1 + jI_1 x_1 = -\underline{E}_1 + I_1 \underline{Z}_1;$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - I'_2 R'_2 - jI'_2 x'_2 = \underline{E}'_2 - I'_2 \underline{Z}'_2,$$

а также и векторные диаграммы трансформатора (рис. 2.22).

Падение напряжения в силовых трансформаторах при холостом ходе пренебрежительно мало, поскольку ток холостого хода составляет несколько процентов от номинального тока. При номинальной нагрузке падение напряжения на первичной обмотке трансформатора $I_{1H} Z_1$ состав-

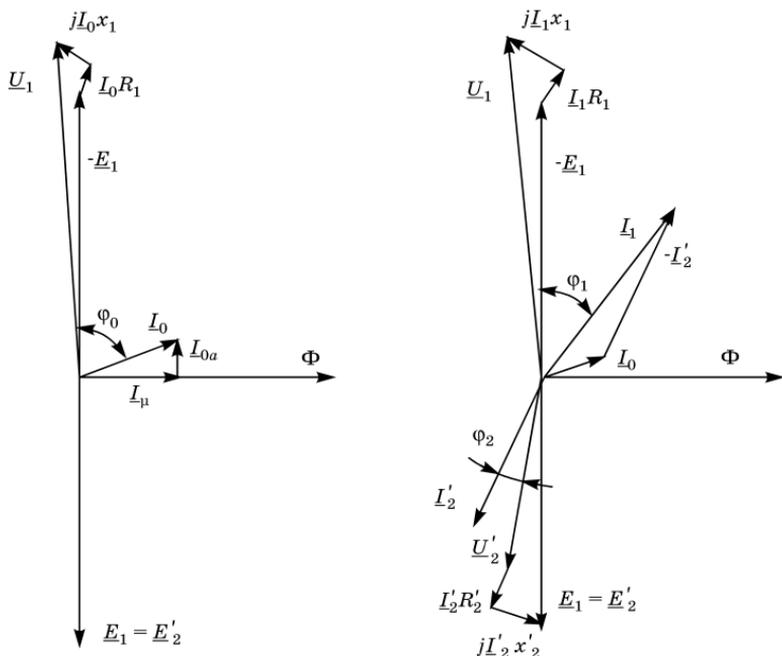


Рис. 2.22

Векторные диаграммы трансформатора при холостом ходе и при активно-индуктивной нагрузке

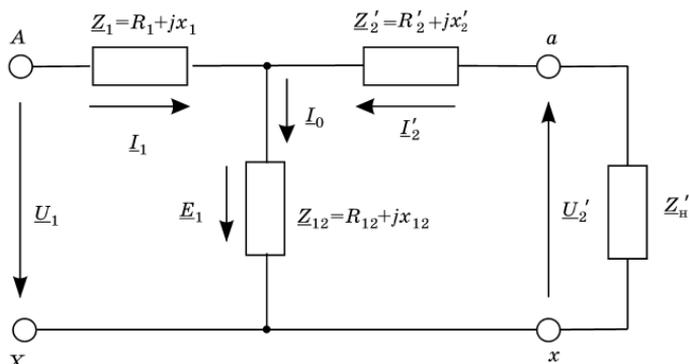


Рис. 2.23

Схема замещения с параметрами в комплексной форме

ляет 1–3% от $U_{1н}$. Таким образом, при постоянной величине подводимого напряжения и, учитывая соотношение $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1$, ЭДС E_1 , основной поток Φ и намагничивающий ток остаются практически неизменными от холостого хода до номинальной нагрузки трансформатора.

При преобразовании параллельного соединения параметров намагничивающего контура в последовательное соединение получаем схему замещения с параметрами в комплексной форме (рис. 2.23). Здесь потери в стали отображает величина $I_0^2 R_{12} = I_{0a}^2 R_{\mu}$.

Сопротивление Z_{12} значительно больше, чем Z_1 и Z_2' . Если в схеме замещения при нагрузке трансформатора исключить ветвь намагничивания (пренебречь током I_0), то получим упрощенную схему замещения, соответствующие ей уравнение $U_1 = -U_2' + I_1 Z_{\kappa}$ и векторную диаграмму (рис. 2.24). Упрощенная схема за-

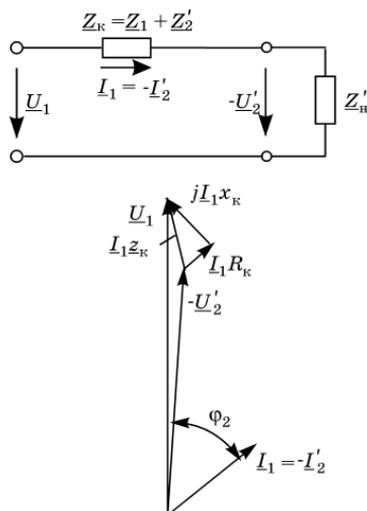


Рис. 2.24

Упрощенная схема замещения и векторная диаграмма трансформатора

мещения и векторная диаграмма чаще всего используются при анализе эксплуатационных свойств силового трансформатора.

Сопротивление $Z_k = R_k + jx_k$ является токоограничивающим сопротивлением трансформатора в случае его внезапного короткого замыкания. Это сопротивление и его составляющие $R_k = R_1 + R'_2$ и $x_k = x_1 + x'_2$ называют сопротивлениями короткого замыкания.

2.7. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Способом определения параметров изготовленного трансформатора является способ, основанный на проведении несложных опытов холостого хода и короткого замыкания (рис. 2.25). По-прежнему рассматривается одна фаза трехфазного трансформатора или однофазный трансформатор.

По показаниям приборов при номинальном первичном напряжении определяют модуль комплексного сопротивления холостого хода, активное и индуктивное сопротивление холостого хода:

$$\begin{aligned} Z_0 &= U_1 / I_0; \\ R_0 &= P_0 / I_0^2; \\ x_0 &= \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \end{aligned}$$

при этом

$$\begin{aligned} Z_0 &= |Z_1 + Z_{12}|; \\ R_0 &= R_1 + R_{12}; \\ x_0 &= x_1 + x_{12}. \end{aligned}$$

При незначительной величине тока холостого хода можно принять, что мощность холостого хода P_0 представляет собой потери в стали $P_c = P_0 - I_0^2 R_1 \approx P_0$.

Другие параметры трансформатора определяют из опыта короткого замыкания. При проведении опыта первичное напряжение трансформатора постепенно повышают и устанавливают таким, чтобы ток короткого замыкания $I_{1к}$

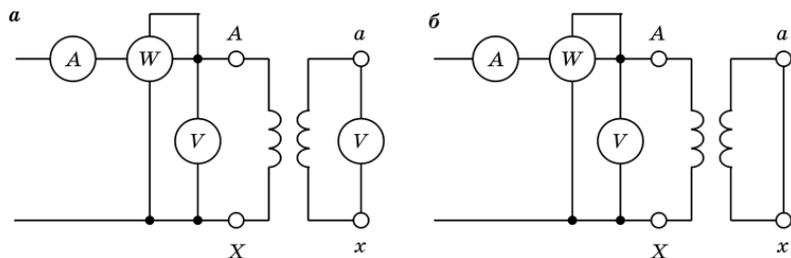


Рис. 2.25

Схемы опытов холостого хода и короткого замыкания

стал равен номинальному току. Напряжение, при котором $I_{1к} = I_{1н}$ составляет 5–10% от номинального напряжения. Эту относительную величину напряжения называют напряжением короткого замыкания:

$$u_{к} \% = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100 = \frac{I_{1н} \cdot Z_{к}}{U_{1н}} \cdot 100.$$

При малой величине подводимого напряжения потери в стали, пропорциональные квадрату напряжения, очень малы, а результирующий ток $I_0 = I_1 + I_2'$ близок к нулю. Мощность короткого замыкания, потребляемая из сети при номинальном токе, принимается равной электрическим потерям трансформатора:

$$P_{кн} = I_{1н}^2 R_{к} = I_{1н}^2 (R_1 + R_2').$$

По показаниям приборов при номинальном токе определяют сопротивления короткого замыкания:

$$\begin{aligned} Z_{к} &= U_{1к} / I_{1н}; \\ R_{к} &= P_{к} / I_{1н}^2; \\ x_{к} &= \sqrt{Z_{к}^2 - R_{к}^2}. \end{aligned}$$

Для трансформатора принимают:

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_2' = Z_{к} / 2; \\ R_1 &= R_2' = R_{к} / 2; \\ x_1 &= x_2' = x_{к} / 2. \end{aligned}$$

Считая параметры трансформатора независимыми от тока, установившийся ток короткого замыкания $I_{1кн}$ при

номинальном первичном напряжении определяется из соотношения:

$$\frac{I_{1\text{кн}}}{I_{1\text{н}}} = \frac{U_{1\text{н}}}{U_{1\text{к}}} = \frac{100}{u_{\text{н}}\%}.$$

Например, при значении $u_{\text{н}}\% = 5\text{--}10\%$ установившийся ток короткого замыкания превосходит номинальный ток в 10–20 раз.

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания:

$$u_{\text{ка}}\% = \frac{I_{1\text{н}}R_{\text{к}}}{U_{1\text{н}}} \cdot 100;$$

$$u_{\text{кр}}\% = \frac{I_{1\text{н}}x_{\text{к}}}{U_{1\text{н}}} \cdot 100.$$

Основными эксплуатационными показателями трансформатора являются изменение вторичного напряжения и изменение значения КПД при изменении нагрузки. Арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением $U_{2\text{н}} = U_{1\text{н}}/k$ и вторичным напряжением U_2 при

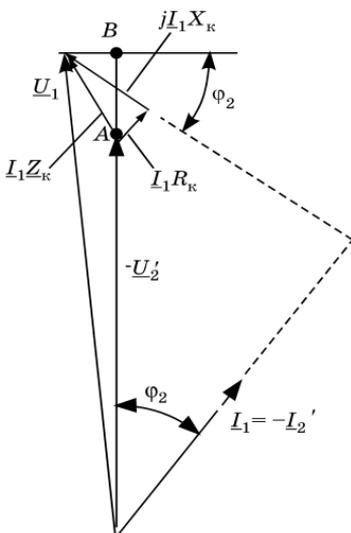


Рис. 2.26
Определение изменения
напряжения при нагрузке

нагрузке называется *изменением вторичного напряжения трансформатора* и выражается в процентах по отношению к номинальному вторичному напряжению:

$$\begin{aligned} \Delta u\% &= \frac{U_{2\text{н}} - U_2}{U_{2\text{н}}} \cdot 100 = \\ &= \frac{U_{1\text{н}} - U_2'}{U_{1\text{н}}} \cdot 100. \end{aligned}$$

Величина изменения вторичного напряжения $\Delta u\%$ может быть определена через параметры трансформатора на основе упрощенной векторной диаграммы. Так, за арифметическую разность между векторами $U_{1\text{н}}$ и $-U_2'$ можно

принять отрезок AB (рис. 2.26), равный разности между проекцией вектора $\underline{U}_{1н}$ на продолжение вектора $-U'_2$ и самим вектором $-U'_2$, поскольку величина падения напряжения $I_1 Z_k$ в силовых трансформаторах незначительна по сравнению с $U_{1н}$.

Величина отрезка:

$$\overline{AB} = \Delta u \frac{I_1 R_k \cos \varphi_2 + I_1 x_k \sin \varphi_2}{U_{1н}}.$$

Выражая ток нагрузки через номинальный ток $I_2 = \beta I_{2н}$ или $I_1 = \beta I_{1н}$, где β — степень загрузки трансформатора ($\beta = I_1/I_{1н} = I_2/I_{2н} = S_1/S_n$, где S_1 — мощность трансформатора при определенной степени загрузки; S_n — номинальная мощность трансформатора), формулу для $\Delta u\%$ можно переписать в виде:

$$\Delta u\% = \frac{\beta(I_{1н} R_k \cos \varphi_2 + I_{1н} x_k \sin \varphi_2)}{U_{1н}} \cdot 100\%$$

или

$$\Delta u\% = \beta(U_{ка}\% \cos \varphi_2 + U_{кр}\% \sin \varphi_2).$$

Из последнего выражения следует, что при неизменном характере нагрузки ($\varphi_2 = \text{const}$) зависимость $\Delta u\% = f(\beta)$ является прямолинейной. Если принять, что $\beta = \text{const}$, то максимум зависимости $\Delta u\% = f(\varphi_2)$ определяется из исследования функции:

$$\frac{du\%}{d\varphi_2} = \beta(-U_{ка}\% \sin \varphi_2 + U_{кр}\% \cos \varphi_2) = 0.$$

Таким образом, $\Delta u\% = \Delta u\%_{\text{max}}$, когда $\varphi_2 = \text{arctg}(x_k/R_k) = \varphi_{2к}$ (см. рис. 2.27). Зависимость $U_2 = f(I_2)$ при определенном значении $\varphi_2 = \text{const}$ нагрузки называется внешней характеристикой трансформатора.

Отметим, что при возможном активно-емкостном характере нагрузки величина $\Delta u\%$ может быть отрицательной. При этом характере нагрузки потоки рассеяния, меняя фазу, оказывают на трансформатор подмагничивающее действие, и его вторичное напряжение может возрасти по сравнению с номинальным напряжением.

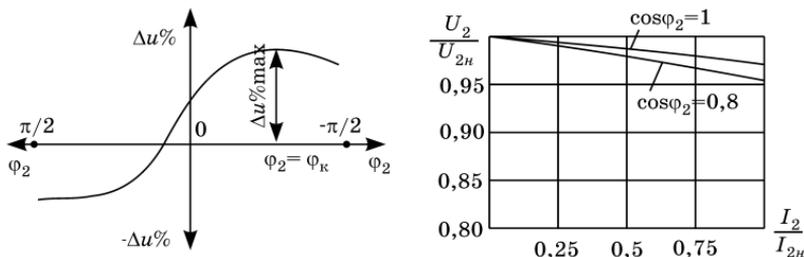


Рис. 2.27

Характер изменения вторичного напряжения при нагрузке и внешняя характеристика трансформатора

Если для трансформатора ввести понятие номинальной активной мощности P_{2H} и выразить мощность $P_2 = \beta P_{2H}$, то КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta P_{2H}}{\beta P_{2H} + P_c + \beta^2 P_{KH}},$$

где P_c — потери в стали магнитопровода или постоянные потери, определяемые из опыта холостого хода; P_{KH} — потери, определяемые из опыта короткого замыкания при номинальном токе; β — степень загрузки трансформатора.

Степень загрузки, определяющая максимум КПД, определяется из исследования на максимум функции

$$\frac{d\eta}{d\beta} = \frac{P_{2H} (\beta P_{2H} + P_c + \beta^2 P_{KH}) - \beta P_{2H} (P_{2H} + 2\beta P_{KH})}{(\beta P_{2H} + P_c + \beta^2 P_{KH})^2} = 0.$$

При отличном от нуля знаменателе:

$$P_{2H} (\beta P_{2H} + P_c + \beta^2 P_{KH}) - \beta P_{2H} (P_{2H} + 2\beta P_{KH}) = 0;$$

$$P_c = \beta^2 P_{KH},$$

и степень загрузки, определяющая максимум КПД:

$$\beta = \sqrt{\frac{P_c}{P_{KH}}}.$$

При проектировании силового трансформатора можно получить практически любое соотношение между потерями в стали P_c и потерями электрическими при номинальном токе P_{KH} , так как оно определяется соотношением между количеством заложеного в трансформатор провод-

никового материала обмоток и стали магнитопровода. При проектировании значение $\alpha = P_{\text{кн}}/P_{\text{с}}$ выбирают соответствующее предполагаемым условиям загрузки трансформатора. Если трансформатор будет работать постоянно сильно загруженным, то его выгодно спроектировать с малым значением α , и наоборот.

Для силовых трансформаторов значение $\alpha = P_{\text{кн}}/P_{\text{с}}$ обычно составляет 4–7. На рисунке 2.28 приведены типичные зависимости $\eta = f(\beta)$ при различном характере нагрузки и разных значениях $\cos\varphi_2$.

При номинальной нагрузке КПД трансформатора:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{P_{2\text{н}} + P_{\text{с}} + P_{\text{кн}}}$$

составляет 97–99%.

В таблице 2.4 приведены технические данные масля-

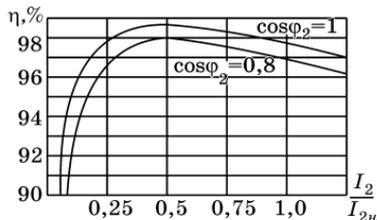


Рис. 2.28
Зависимость КПД трансформатора от степени загрузки

Т а б л и ц а 2.4

Технические данные трансформаторов серии ТМ

Тип	$S_{\text{н}}$, кВА	$U_{\text{вн}}$, кВ	Группа соединения	$u_{\text{к}}$, %	P_0 , Вт	$P_{\text{к}}$, Вт
ТМ	25	6; 10	Y/Y _н -0	4,5	115	600
ТМ			Y/Z _н -11	4,7		690
ТМ	40	6; 10	Y/Y _н -0	4,5	155	880
ТМ			Y/Z _н -11	4,7		1000
ТМ	63	6; 10	Y/Y _н -0	4,5	220	1280
ТМ			Y/Z _н -11	4,7		1470
ТМГ	100	6; 10	Y/Y _н -0	4,5	270	1970
ТМГ			Y/Z _н -11	4,7		2270
ТМГ	160	6; 10	Y/Y _н -0	4,5	410	2600
ТМГ			Y/Z _н -11	4,7		2900
ТМГ	250	6; 10	Y/Y _н -0	4,5	580	3700
ТМГ	400	6; 10	Y/Y _н -0	4,5	830	5400
ТМГ	630	6; 10	Y/Y _н -0	5,5	1240	7600
ТМ	1000	6; 10	Y/Y _н -0	5,5	1600	10 800
ТМГ	1600	10	Y/Y _н -0	6,0	2300	16 500

ных трансформаторов серии ТМ и ТМГ (Г — герметичный — без бака-расширителя) мощностью 25–1600 кВА ($U_{\text{нн}} = 0,4 (0,23) \text{ кВ}$) с соединением обмоток $Y/Y_{\text{н}}$ и $Y/Z_{\text{н}}$.

Соотношение потерь, степень загрузки, определяющая максимум КПД и номинальный КПД трансформатора ТМ-25 ($P_{\text{с}} \approx P_0$), принимая условно $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = 1$ ($S_{\text{н}} = P_{2\text{н}}$):

$$\alpha = \frac{P_{\text{кн}}}{P_{\text{с}}} = \frac{600}{115} = 5,2;$$

$$\beta = \sqrt{\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{кн}}}} = \sqrt{\frac{115}{600}} = 0,44;$$

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{P_{2\text{н}} + P_{\text{с}} + P_{\text{к}}} = \frac{25}{25 + 0,115 + 0,6} = 0,97.$$

Для трансформатора ТМГ-1600:

$$\alpha = \frac{16\,500}{2300} = 7;$$

$$\beta = \sqrt{\frac{115}{600}} = 0,44;$$

$$\eta_{\text{н}} = \frac{1600}{1600 + 2,3 + 16,5} = 0,97.$$

2.8. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

При необходимости расширения мощности трансформаторной подстанции нагрузку могут питать несколько трансформаторов, которые включают на параллельную работу. При длительных сезонных колебаниях нагрузки часть параллельно включенных трансформаторов может быть отключена с тем, чтобы оставшиеся трансформаторы были нагружены наиболее рационально и работали с оптимальным КПД.

Параллельная работа трансформаторов протекает наиболее благоприятно в том случае, если нагрузка распределена пропорционально их номинальным мощностям и между трансформаторами не протекают уравнительные токи. Для выполнения этих условий необходимо равен-

ство коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания, а также должны быть одинаковыми группы соединения обмоток.

Рассмотрим влияние на параллельную работу двух однофазных трансформаторов несоблюдения указанных условий.

Пусть коэффициент трансформации k_I первого трансформатора меньше коэффициента трансформации k_{II} второго трансформатора ($k_I < k_{II}$) (рис. 2.29). Поскольку к трансформаторам подводится одинаковое напряжение U_1 , то

$$U_{2I} = U_1 / k_I > U_{2II} = U_1 / k_{II},$$

причем U_{2I} и U_{2II} совпадают по фазе.

Под действием разности напряжений $\Delta U = U_{2I} - U_{2II}$ в трансформаторах потечет уравнительный ток I_y , смещенный относительно вектора ΔU на угол

$$\varphi_R = \arctg \frac{x_{KI} + x_{KII}}{R_{KI} + R_{KII}}.$$

По отношению к уравнительному току трансформатор находится в режиме короткого замыкания. Уравнительный ток, создавая падения напряжения, способствует установлению единого вторичного напряжения. При незначительной разнице между k_I и k_{II} можно записать, что $k_I \cdot k_{II} = (k_{cp})^2$, где k_{cp} — средний коэффициент трансформации трансформаторов. На зажимах вторичной обмотки

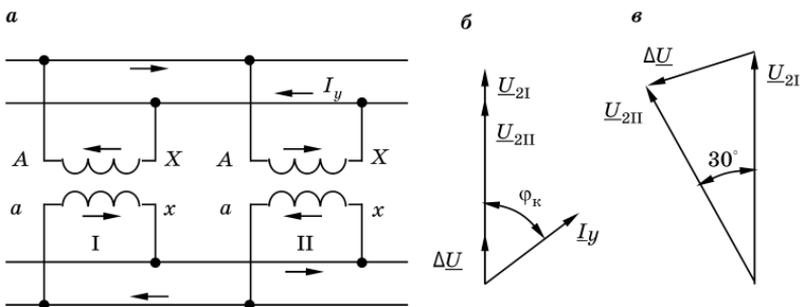


Рис. 2.29

Распределение уравнительного тока (а) и диаграммы напряжений при неравенстве коэффициентов трансформации (б) и несовпадении групп соединения обмоток (в)

установится напряжение, соответствующее этому среднему коэффициенту трансформации, $U_2 = U_1/k_{cp}$. В этом случае разность напряжений ΔU и уравнивающий ток I_y можно выразить следующим образом:

$$\Delta U = U_{2I} - U_{2II} = U_2 \frac{k_{II}}{k_{cp}} - U_2 \frac{k_I}{k_{cp}} = U_2 \frac{k_{II} - k_I}{k_{cp}} = U_2 \Delta k;$$

$$I_y = \frac{U_2 \Delta k}{|Z_{kI}^* + Z_{kII}^*|},$$

где $Z_{kI}^* = Z_{kI} / k_I^2$ и $Z_{kII}^* = Z_{kII} / k_{II}^2$ — сопротивления короткого замыкания со стороны вторичных обмоток; $\Delta k = (k_{II} - k_I) / k_{cp}$.

Обычно ток I_y выражают в процентном отношении от номинального тока одного из трансформаторов, например от тока $I_{2нI}$. Если предположить, что параллельно включены два трансформатора одинаковой мощности, конструктивно подобные, у которых $I_{2нI} = I_{2нII} = I_{2н}$, $Z_{kI}^* = Z_{kII}^*$, то для $U_2 = U_{2н}$ можно записать:

$$I_y \% = \frac{I_y}{I_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{2н} \cdot \Delta k}{I_{2н} \cdot 2Z_{k}^*} = \frac{\Delta k \% \cdot 100}{2u_k \%}.$$

Пусть, например, $\Delta k \% = 1\%$ и $u_k \% = 5\%$. Тогда $I_y \% = 10\%$. При наличии нагрузки уравнивающий ток накладывается на токи нагрузки. Ток первого трансформатора $I_{2I} = I_{н2I} + I_y$, второго $I_{2II} = I_{н2II} - I_y$. Один из трансформаторов может быть перегружен по току, а второй недогружен. Таким образом, сколько-нибудь заметное неравенство коэффициентов трансформации недопустимо. Для силовых трансформаторов $\Delta k\%$ не должно превышать 0,5%.

По причине большой величины ΔU недопустима параллельная работа трансформаторов с различными группами соединения обмоток. Если предположить, что на параллельную работу включены трансформаторы, например У/У-0 и У/Д-11, то при $U_{2I} = U_{2II} = U_{2н}$ между одноименными зажимами вторичных обмоток будет действовать разность напряжений $\Delta U = 2U_{2н} \sin 15^\circ \approx 0,517U_{2н}$, что недопустимо.

Если первичные и вторичные напряжения трансформаторов равны по величине и совпадают по фазе, следова-

тельно, равны и падения напряжения в трансформаторах. Например, для двух параллельно включенных трансформаторов (рис. 2.30), $I_I Z_{кI} = I_{II} Z_{кII}$.

Если мощность параллельно включенных трансформаторов отличается незначительно, то можно принять, что $\varphi_{кI} = \varphi_{кII}$. В таком случае $I_I Z_{кI} = I_{II} Z_{кII}$, или $I_I/I_{II} = Z_{кII}/Z_{кI} = (u_{кII}\% I_{нI}) / (u_{кI}\% I_{нII})$. Разделив первые члены в обеих частях равенства на $I_{нI}$, а вторые на $I_{нII}$, получим:

$$\frac{\left(\frac{I_I}{I_{нI}}\right)}{\left(\frac{I_{II}}{I_{нII}}\right)} = \frac{\beta_I}{\beta_{II}} = \frac{u_{кII}\%}{u_{кI}\%}.$$

Пусть, например, включены на параллельную работу два трансформатора мощностью по 100 кВА, причем у первого $u_{кI}\% = 5\%$, а у второго $u_{кII}\% = 4\%$, т. е. $u_{кII}\% / u_{кI}\% = 0,8$. В этом случае при стопроцентной загрузке второго трансформатора $\beta_{II} = 1$, первый будет нагружен всего лишь на 80%. Общая мощность составит 180, а не 200 кВА. Дальнейшему увеличению нагрузки препятствует перегрузка второго трансформатора. Следовательно, при различных значениях $u_{к}\%$ не может быть полностью использована установленная мощность трансформаторов. Такие условия параллельной работы нельзя признать удовлетворительными, поэтому трансформаторы, предназначенные для параллельной работы, должны иметь напряжения короткого замыкания, отклоняющиеся от их среднего арифметического значения не более чем на $\pm 10\%$.

Возможные отступления от наиболее благоприятных условий работы тем больше, чем больше разница между мощностью трансформаторов, поэтому отношение между наибольшей и наименьшей мощностью параллельно включенных трансформаторов не должно превышать 3:1.

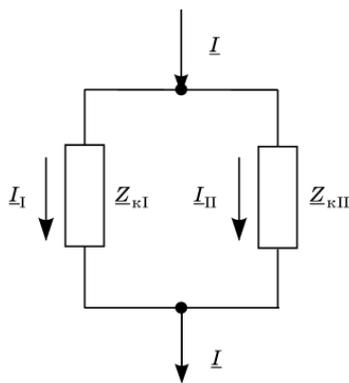


Рис. 2.30
Упрощенная схема замещения трансформаторов

2.9. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Наиболее вероятной причиной несимметричных явлений в трансформаторах является несимметричная нагрузка из-за неравномерности распределения ее по фазам. Несимметричные явления приводят к несимметрии вторичных напряжений, что отрицательно сказывается на работе однофазных двигателей, бытовых приборов, ламп накаливания. Для самого трансформатора несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузок отдельных обмоток.

При рассмотрении несимметричной работы трехфазных трансформаторов будем считать известными все сопротивления, включая и сопротивления нагрузки. Принимаем также, что к трансформатору подведена симметричная система первичных линейных напряжений \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} , по которым могут быть определены фазные напряжения $\underline{U}_A = (\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA})/3$, $\underline{U}_B = (\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB})/3$, $\underline{U}_C = (\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC})/3$.

Методом исследования несимметричных режимов работы является метод симметричных составляющих, согласно которому три вектора \vec{A} , \vec{B} , \vec{C} , изображающих гармонически изменяющиеся величины (рис. 2.31), можно разложить на векторные системы прямой последовательности (очередность во времени достижения максимумов векторов \vec{A}_1 , \vec{B}_1 , \vec{C}_1), обратной последовательности (очередность во времени достижения максимумов векторов \vec{A}_2 , \vec{B}_2 , \vec{C}_2) и нулевой последовательности (совпадение по фазе векторов \vec{A}_0 , \vec{B}_0 , \vec{C}_0), при этом:

$$\vec{A}_1 = \frac{1}{3}(\vec{A} + a\vec{B} + a^2\vec{C});$$

$$\vec{A}_2 = \frac{1}{3}(\vec{A} + a^2\vec{B} + a\vec{C});$$

$$\vec{A}_0 = \frac{1}{3}(\vec{A} + \vec{B} + \vec{C}),$$

где $a = e^{j2\pi/3}$ — множитель трехфазной системы или оператор поворота векторов на 120° против хода часовой стрелки.

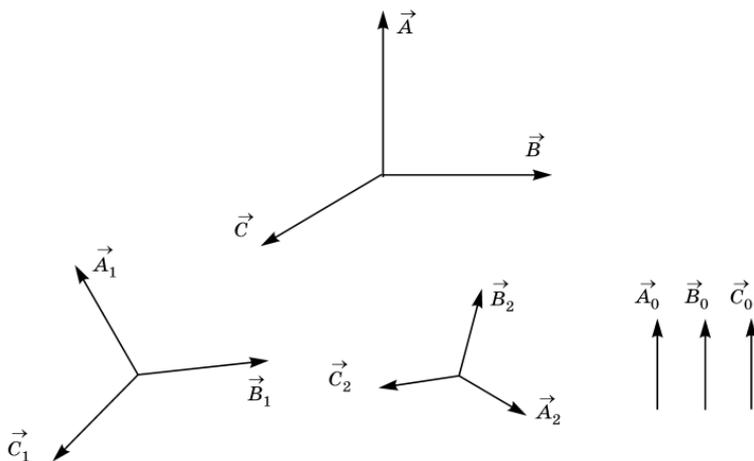


Рис. 2.31

Разложение трех векторов на симметричные составляющие

По известным сопротивлениям можно найти напряжения всех последовательностей, а затем, пользуясь методом наложения, подсчитать действительные токи и напряжения обмоток трехфазного трансформатора.

Для трехфазного трансформатора — статического аппарата сопротивление прямой последовательности равно сопротивлению обратной последовательности. Для него безразлично, подведена ли к его зажимам система напряжений ABC или ACB . Исходя из этого, нет смысла рассматривать отдельно токи прямой и обратной последовательности, а можно рассматривать их сумму, тогда:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A12} + \underline{I}_{A0};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{B12} + \underline{I}_{B0};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{C12} + \underline{I}_{C0},$$

где

$$\underline{I}_{A12} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2};$$

$$\underline{I}_{B12} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2};$$

$$\underline{I}_{B12} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}.$$

Для токов прямой и обратной последовательности и их суммы справедливы обычные схемы замещения трансформатора.

Токи нулевой последовательности в любой момент времени во всех трех фазах имеют одинаковую величину и направление, и их сумма не равна нулю. Поэтому сопротивление токам нулевой последовательности может существенно отличаться от сопротивления токам прямой и обратной последовательности. Величина этого сопротивления зависит от схемы соединения обмоток и конструкции сердечника. Токи нулевой последовательности могут протекать по обмоткам трансформатора, если имеется нулевой провод или заземленная нейтраль (при заземленной нейтрали подразумевается, что на другом конце линии имеется также заземленная нейтраль).

При соединении обмоток по схемам У/Д или Д/У в обмотке Д могут протекать токи нулевой последовательности, но отсутствует причина их возникновения — в замкнутом треугольнике $\Sigma U = 0$. Здесь нет токов и потоков нулевой последовательности. В случае, когда нет токов нулевой последовательности, первичные и приведенные вторичные токи равны и противоположны по фазе (пренебрегая током холостого хода).

При схеме У/У_н токи нулевой последовательности могут протекать по вторичной обмотке. Этот ток подобен току холостого хода трансформатора, так как не уравновешен аналогичным током с первичной стороны. Под действием МДС, обусловленной током нулевой последовательности, в сердечниках трехфазного трансформатора появится поток, величина которого зависит от магнитного сопротивления $R_{\mu c}$ пути его прохождения. В трехстержневом трансформаторе поток нулевой последовательности мал, так как он замыкается по пути с большим магнитным сопротивлением (стержень, верхнее ярмо, масло, стенка бака, масло, нижнее ярмо) (рис. 2.32).

При симметричном режиме сопротивление намагничивающего контура $Z_{12} = E_1/I_0$. Учитывая, что $E_1 \equiv \Phi \equiv I_0/R_{\mu c}$, можно записать $Z_{12} \equiv 1/R_{\mu c}$.

Для схем замещения нулевой последовательности считаем, что сопротивления обмоток Z_1 и Z'_2 такие же величины, как и при симметричном режиме. Сопротивление намагничивающего контура Z_{120} , определяемое в

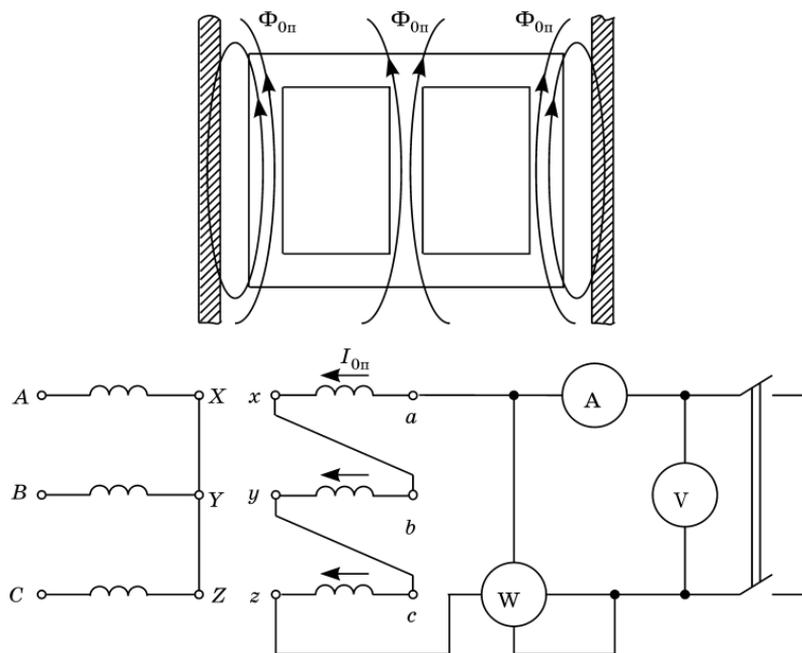


Рис. 2.32
Пути замыкания потоков нулевой последовательности
и опытное определение Z_{120}

основном потоком взаимной индукции нулевой последовательности, может значительно отличаться от Z_{12} схемы замещения при симметричном режиме работы трансформатора. Для схемы Y/Y_n трехстержневого трансформатора $Z_{120} \ll Z_{12}$. В этом случае за сопротивление токам нулевой последовательности принимают сопротивление $Z_{0\pi} = Z_k + Z'_2$.

При соединении обмоток по схеме D/Y_n первичная обмотка представляет собой короткозамкнутый контур для индуцируемых в ней ЭДС и токов нулевой последовательности, вследствие чего они оказывают сильное размагничивающее действие. Такой трансформатор в отношении токов, напряжений и потоков нулевой последовательности работает как бы в режиме короткого замыкания. В результате размагничивающего эффекта потоки и ЭДС нулевой последовательности малы. Для этой схемы $Z_{0\pi} = Z_k$.

НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ОБОТКОВ У/Д

На рисунке 2.33 для фазы A показана упрощенная схема замещения для сумм токов и напряжений прямой и обратной последовательности, а также диаграммы фазных и линейных напряжений. Токи нулевой последовательности отсутствуют. Первичные и вторичные токи и напряжения: $\underline{I}_A = \underline{I}_{A12}$, $\underline{I}'_a = \underline{I}'_{a12}$, $\underline{U}_A = \underline{U}_{A12}$, $\underline{U}'_a = \underline{U}'_{a12}$. Аналогичные соотношения справедливы и для других фаз.

Ввиду малой величины Z_k несимметрия вторичных напряжений из-за разных протекающих по фазам токов незначительна:

$$\begin{aligned} -\underline{U}'_a &= \underline{U}_A - \underline{I}_A Z_k; \\ -\underline{U}'_b &= \underline{U}_B - \underline{I}_B Z_k; \\ -\underline{U}'_c &= \underline{U}_C - \underline{I}_C Z_k. \end{aligned}$$

НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ОБОТКОВ У/У_н

Схемы соединений и схемы замещения приведены на рисунке 2.34 ($I_{нп}$ — ток в нулевом проводе).

Токи нулевой последовательности протекают по вторичной обмотке. Их действие не ослабляется соответствующими токами в первичной обмотке, поэтому их можно считать практически намагничивающими токами.

Согласно схемам замещения:

$$\begin{aligned} -\underline{U}'_{a12} &= \underline{U}_{A12} - \underline{I}_A Z_k; \\ \underline{U}_{A0} &= \underline{I}'_{a0} Z_{120}; \\ -\underline{U}'_{a0} &= \underline{I}'_{a0} (Z_{120} + Z'_2), \end{aligned}$$

а также

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A12} + \underline{U}_{A0} = \underline{U}_{A12} + \underline{I}'_{a0} Z_{120}; \\ -\underline{U}'_a &= -\underline{U}'_{a12} - \underline{U}'_{a0} = \\ &= \underline{U}_{A12} - \underline{I}_A Z_k + \underline{I}'_{a0} (Z_{120} + Z'_2) = \\ &= \underline{U}_{A12} - \underline{I}_A Z_k - \underline{U}'_{a0}. \end{aligned}$$

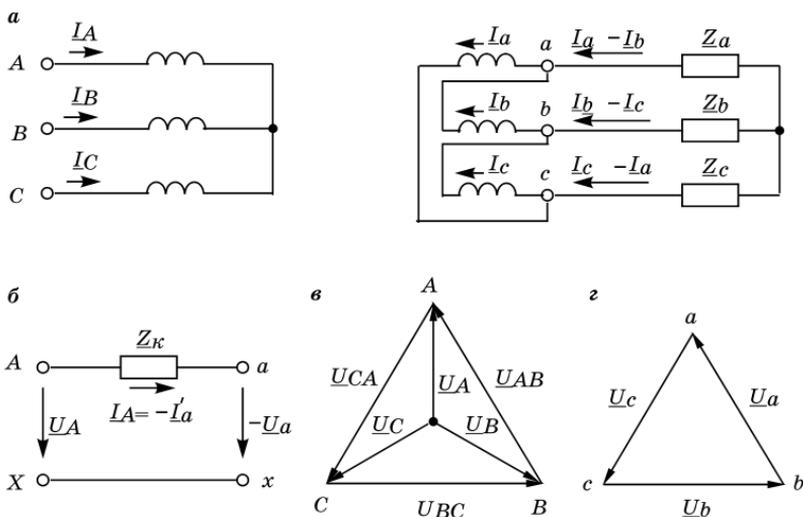


Рис. 2.33

Схема соединения Y/D (а), схема замещения (б) и векторные диаграммы напряжений первичной обмотки (в) и вторичной обмотки (z)

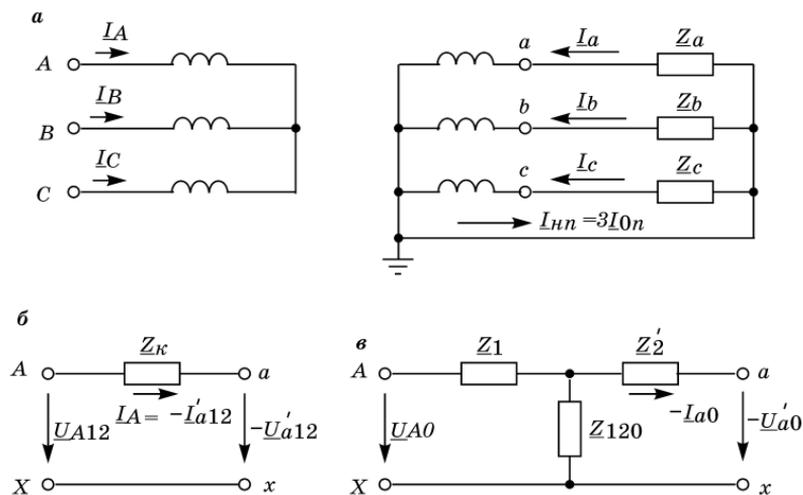


Рис. 2.34

Схема соединения Y/Y_n (а), схемы замещения для сумм прямой и обратной последовательности (б) и для нулевой последовательности (в)

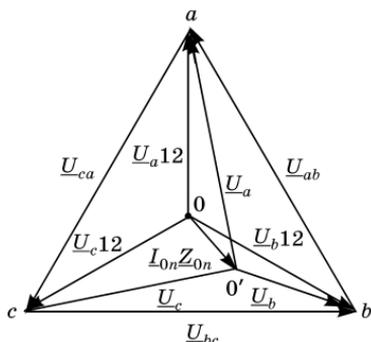


Рис. 2.35
Векторная диаграмма
вторичных напряжений

Смещение нейтрали определяет ток нулевой последовательности $I_{0n} = I'_{a0} = I'_{b0} = I'_{c0}$. Смещение нейтрали для первичной обмотки $I_{0n}Z_{120}$ и вторичной обмотки $I_{0n}(Z_{120} + Z'_2) = I_{0n}Z_{120}$.

Несимметрия фазных вторичных напряжений (рисунок 2.35, отрезок OO' — смещение нейтрали) оказывает отрицательное влияние на работу однофазных потребителей.

НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ОБОТКОВ Y/Z_n

Схема соединений обмоток трансформатора Y/Z_n приведена на рисунке 2.36.

При несимметричной нагрузке токи нулевой последовательности могут протекать только во вторичной обмотке. Эти токи обтекают полуфазы обмоток, расположенных на каждом из стержней, в противоположных направлениях, следовательно, сумма МДС от токов нулевой последовательности равна нулю. Токи нулевой последовательности создают поле рассеяния и практически не создают поле взаимной индукции, следовательно для этой схемы $Z_{120} \approx 0$. В этом заключается преимущество соединения обмоток по схеме Y/Z_n перед схемой Y/Y_n , где токи нулевой последовательности создают поток взаимной индукции. Для

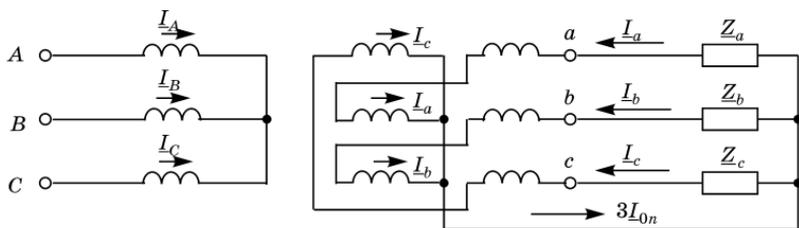


Рис. 2.36
Схема соединения Y/Z_n

схемы Y/Z_n смещение нейтрали вторичных напряжений (отрезок OO' на рисунке 2.35) становится практически незаметным.

2.10. ЯВЛЕНИЯ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ТРАНСФОРМАТОРА

Если приложенное к однофазному трансформатору напряжение синусоидально, то практически синусоидальным и поток ($U_1 \approx E_1 \equiv \Phi$), но намагничивающий ток будет несинусоидальным из-за нелинейности кривой намагничивания магнитопровода. Наоборот, вследствие указанной нелинейности, если бы намагничивающий ток был синусоидальным, то поток, следовательно и фазные напряжения, были бы несинусоидальными. На рисунке 2.37 показано графическое построение намагничивающего тока и магнитного потока применительно к однофазному трансформатору. Как видно из рисунка, намагничивающий ток при синусоидальном магнитном потоке содержит все нечетные гармоники. Наибольшую амплитуду имеет третья гармоника. Нетрудно заметить: когда из намагничивающего тока выпадет какая-либо гармоника, она появляется в потоке и соответственно в напряжении, что в отдельных случаях может привести к повышению амплитуды напряжения. Поскольку причиной возникновения высших гармоник является магнитопровод, то он является как бы генератором этих гармоник.

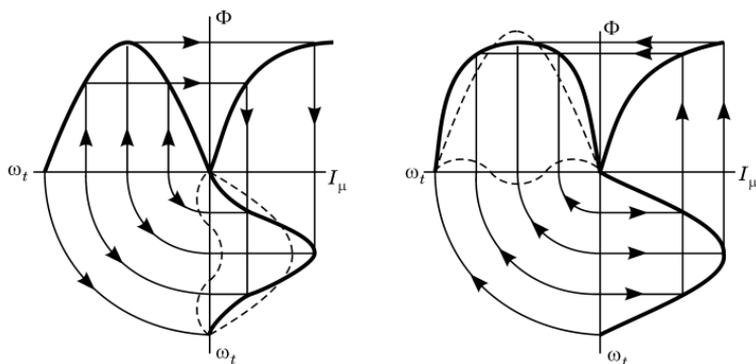


Рис. 2.37

Построение намагничивающего тока и магнитного потока

В отличие от однофазного трансформатора обмотки трехфазных трансформаторов создают неодинаковые условия для прохождения токов третьих гармоник. В симметричной трехфазной цепи, подключенной к симметричному синусоидальному напряжению, токи разных гармоник могут быть только одной определенной последовательности. Токи гармоник $6n + 1$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) со сдвигом в фазах на 120° являются токами прямой последовательности. Токи гармоник $6n - 1$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) аналогичны токам обратной последовательности, угол сдвига между ними в фазах 240° . Токи гармоник $3n$ ($n = 1, 3, 5, \dots$) — токи нулевой последовательности, угол сдвига между ними в фазах равен нулю. Если токи прямой и обратной последовательности могут свободно протекать по обмоткам трехфазных трансформаторов, то токи нулевой последовательности могут протекать только в обмотках, соединенных в треугольник или звезду с нулевым проводом.

На основании изложенного выше можно дать характеристику схемам соединения обмоток трехфазных трансформаторов в отношении токов и напряжений нулевой последовательности (в основном третьих временных гармоник, поскольку амплитуды других гармоник, кратных трем, резко убывают).

При схеме соединения Y/Y_n токи нулевой последовательности протекают только по вторичной обмотке. Их величина ограничивается не только сопротивлениями намагничивающего контура и индуктивного сопротивления рассеяния вторичной обмотки трансформатора для данной гармоники, но и сопротивлением нагрузки для этих гармоник. При увеличении сопротивления нагрузки фазные напряжения будут иметь заостренную форму, так как увеличивается амплитуда напряжений третьих гармоник. В линейных напряжениях, составляющих разность фазных напряжений, гармоники нулевой последовательности отсутствуют.

В стержневом трехфазном трансформаторе потоки нулевой последовательности вследствие прохождения их пути с большим магнитным сопротивлением имеют не-

большое значение. Амплитуды ЭДС невелики. Однако прохождение потока, пульсирующего с тройной частотой (для третьей гармоники) по стенкам бака, ведет к образованию вихревых токов и к увеличению потерь.

При соединении обмоток по схеме Y/Δ токи нулевой последовательности протекают только по вторичной обмотке, которая для них представляет собой короткозамкнутый контур. В результате размагничивающего действия этих токов результирующий поток нулевой последовательности резко ослаблен. Гармоники напряжения нулевой последовательности практически отсутствуют. В линейных проводах токов нулевой последовательности нет.

При схеме соединения обмоток Y_N/Δ токи нулевой последовательности будут делиться между первичной и вторичной обмотками обратно пропорционально сопротивлениям путей для токов этих гармоник. Гармоники напряжения нулевой последовательности отсутствуют.

Таким образом, наличие в трансформаторе обмотки, соединенной в треугольник, исключает искажение фазных напряжений и появление высших гармоник тока в линейных проводах.

2.11. ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

В силовой энергетике для питания сетей разным напряжением применяют трехобмоточные трансформаторы. Экономическая целесообразность их применения объясняется тем, что один такой трансформатор заменяет два двухобмоточных трансформатора, вследствие чего капитальные затраты на сооружение подстанции уменьшаются и схема коммутации становится проще. Конструктивно трехобмоточный трансформатор не отличается от двухобмоточного трансформатора. В трехобмоточном трансформаторе на каждом стержне концентрически располагают три обмотки. Обмотка высшего напряжения по условиям изоляции является внешней, обмотки среднего и низшего напряжения можно менять местами в зависимости от того, между какими обмотками желательно иметь меньшее значение напряжения короткого замыкания.

Трехобмоточные трансформаторы выполняют с обмотками как одинаковой, так и разной мощности — разного исполнения (табл. 2.5). Обмотку ВН всегда выполняют на полную мощность. Эту мощность принимают за номинальную мощность трансформатора.

Таблица 2.5

Соотношение мощности обмоток трехобмоточного трансформатора

Исполнение трансформатора	Мощность обмоток, %		
	ВН	СН	НН
1	100	100	100
2	100	100	67
3	100	67	100
4	100	67	67

Схема соединения обмоток			Диаграмма векторов напряжения холостого хода			Условное обозначение
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						$y_H/y_N/\Delta-0-11$
						$y_H/\Delta/\Delta-11-11$

Рис. 2.38

Группы соединения обмоток трехобмоточных трансформаторов

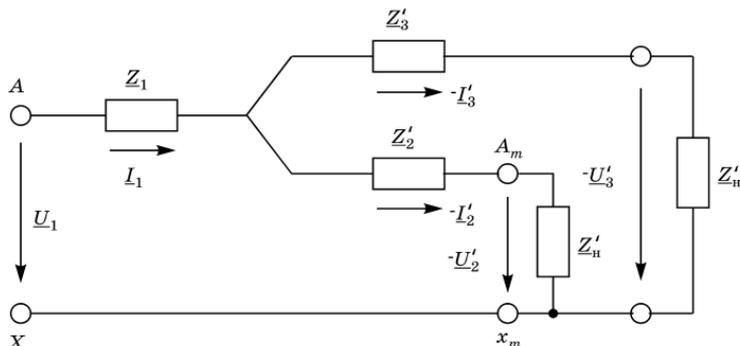


Рис. 2.39

Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Первое исполнение называется исполнением на полную мощность. В этом случае с учетом вероятного в условиях эксплуатации несовпадения графиков нагрузок трансформатор допускает работу любой пары обмоток или сочетания всех трех обмоток на полную номинальную мощность. Остальные исполнения при тех же условиях допускают работу трансформатора при нагрузке обмоток НН и СН на неполную номинальную мощность.

Изготавливают трехфазные трехобмоточные трансформаторы с группой соединения обмоток У/У_н/Д-0-11 или У/Д/Д-11-11 (рис. 2.38).

Схема замещения трехобмоточного трансформатора приведена на рисунке 2.39.

Параметры трехобмоточного трансформатора определяют из опытов холостого хода и короткого замыкания. Из опыта холостого хода определяют ток холостого хода, сопротивление ветви намагничивания, потери в магнитопроводе и коэффициенты трансформации $k_{12} = U_1/U_2$, $k_{13} = U_1/U_3$, $k_{23} = U_2/U_3$. Остальные параметры определяют из опытов короткого замыкания (табл. 2.6).

Когда проводится опыт короткого замыкания между парой обмоток при разомкнутой третьей, трехобмоточный трансформатор работает как двухобмоточный, поэтому сопротивление между любой парой зажимов схемы замещения равно сопротивлению короткого замыкания между соответствующей парой обмоток:

$$\underline{Z}_{к12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2;$$

$$\underline{Z}_{к13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3;$$

$$\underline{Z}_{к23} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}'_3.$$

Т а б л и ц а 2.6

Порядок проведения опытов короткого замыкания

Обмотка, к которой подведено напряжение	Короткозамкнутая обмотка	Сопротивление короткого замыкания
1	2	$\underline{Z}_{к12} = R_{к12} + jX_{к12}$
1	3	$\underline{Z}_{к13} = R_{к13} + jX_{к13}$
2	3	$\underline{Z}_{к23} = R_{к23} + jX_{к23}$

Складывая попарно уравнения и вычитая третье, получаем:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{к12} + Z_{к13} - Z_{к23}}{2}; \\ Z'_2 &= \frac{Z_{к12} + Z_{к23} - Z_{к13}}{2}; \\ Z'_3 &= \frac{Z_{к13} + Z_{к23} - Z_{к12}}{2}. \end{aligned}$$

Аналогично записывают выражения для активных и индуктивных составляющих сопротивлений обмоток.

Напряжения короткого замыкания определяют соответствующие сопротивления короткого замыкания:

$$\begin{aligned} u_{к12} \% &= \frac{I_{1н} Z_{к12}}{U_{1н}} \cdot 100; \\ u_{к13} \% &= \frac{I_{1н} Z_{к13}}{U_{1н}} \cdot 100; \\ u_{к23} \% &= \frac{I_{1н} Z_{к23}}{U_{1н}} \cdot 100. \end{aligned}$$

Таким образом, у трехобмоточного трансформатора напряжение $u_{к} \%$ и потери короткого замыкания $P_{к}$ определяют для каждой пары обмоток, причем в целях единообразия метода расчета все значения $u_{к} \%$ и $P_{к}$ приводят к номинальной мощности, если даже одна или две обмотки рассчитаны на неполную мощность.

Напряжения короткого замыкания определяются в основном реактивными составляющими, которые, в свою очередь, определяются индуктивными сопротивлениями обмоток. Напряжение короткого замыкания между внутренней и внешней обмотками значительно больше, чем напряжения между другими обмотками.

При одновременной загрузке обеих вторичных обмоток изменение напряжения $\Delta u_{к} \%$ в любой паре обмоток трансформатора зависит также от величины и характера нагрузки третьей обмотки:

$$\begin{aligned} \Delta u_{12} \% &= \Delta u_1 \% + \Delta u_2; \\ \Delta u_{13} \% &= \Delta u_1 \% + \Delta u_3, \end{aligned}$$

где для каждой из обмоток:

$$\Delta u_1 \% = \beta_1 (u_{\text{ка}1} \% \cos \varphi_1 + u_{\text{кр}1} \% \sin \varphi_1);$$

$$\Delta u_2 \% = \beta_2 (u_{\text{ка}2} \% \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}2} \% \sin \varphi_2);$$

$$\Delta u_3 \% = \beta_3 (u_{\text{ка}3} \% \cos \varphi_3 + u_{\text{кр}3} \% \sin \varphi_3)$$

— изменение напряжения в процентах от номинального первичного напряжения; $\beta_1 = I_1/I_{1\text{н}}$, $\beta_2 = I_2/I_{2\text{н}}$, $\beta_3 = I_3/I_{3\text{н}}$ — коэффициенты загрузки; $u_{\text{ка}} \%$, $u_{\text{кр}} \%$ — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания.

Если известны значения β_2 , β_3 , $\cos \varphi_2$, $\cos \varphi_3$, то значение $\beta_1 \cos \varphi_1$ для первичной обмотки определяется так: $\beta_1 \cos \varphi_1 \approx \beta_2 \cos \varphi_2 \approx \beta_3 \cos \varphi_3$. Соответственно $\beta_1 \sin \varphi_1 \approx \beta_2 \sin \varphi_2 \approx \beta_3 \sin \varphi_3$.

КПД трехобмоточного трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta_2 P_{\text{н}} + \beta_3 P_{\text{н}}}{\beta_2 P_{\text{н}} + \beta_3 P_{\text{н}} + \Sigma P},$$

где $P_{\text{н}}$ — номинальная активная мощность трансформатора; ΣP — сумма потерь в стали и электрических потерь.

Потери в стали определяют из опыта холостого хода.

Потери электрические на фазу:

$$P_{\text{кн}} = I_{1\text{н}}^2 (\beta_1^2 R_1 + \beta_2^2 R_2' + \beta_3^2 R_3').$$

Соответственно для трех фаз при симметричной нагрузке:

$$P_{\text{кн}} = 3I_{1\text{н}}^2 (\beta_1^2 R_1 + \beta_2^2 R_2' + \beta_3^2 R_3').$$

Параллельная работа трехобмоточных трансформаторов, а также с двухобмоточными трансформаторами, подчиняется тем же требованиям, что и параллельная работа двухобмоточных трансформаторов.

У автотрансформаторов в отличие от трансформатора обмотки помимо магнитной связи имеется электрическая связь (рис. 2.40).

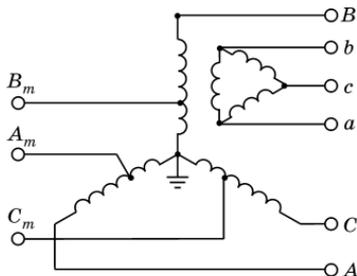


Рис. 2.40

Схема трехфазного автотрансформатора с третичной обмоткой

Силовые автотрансформаторы предназначены для связи электрических сетей напряжением 330 и 110 кВ или 330 и 220 кВ. К обмотке низшего напряжения (НН) может быть подключена нагрузка либо источник активной или реактивной мощности.

Отличительная особенность автотрансформаторов большой мощности состоит в том, что при одинаковой мощности с трансформаторами они имеют меньшие размеры и более высокий КПД. При очень больших мощностях и высоких напряжениях это становится особенно важным.

В быту и лабораторных стендах находят применение и маломощные автотрансформаторы.

Как и трансформатор, автотрансформатор может быть повышающим и понижающим напряжение. Обмотка, к которой подводится энергия, называется первичной, а от которой отводится энергия — вторичной.

Мощность третичной обмотки автотрансформатора равна мощности, передаваемой магнитным полем. Эта обмотка может служить для компенсации гармоник нулевой последовательности с целью стабилизации положения нейтральной точки при несимметрии нагрузок. В этом случае ее мощность равна 25% от мощности автотрансформатора, передаваемой с помощью магнитного поля.

Для выявления основных свойств автотрансформаторов рассмотрим работу одной фазы, например, понижающего, автотрансформатора (рис. 2.41). Обмотку «А-а» называют последовательной, обмотку «а-х» — общей. Пос-

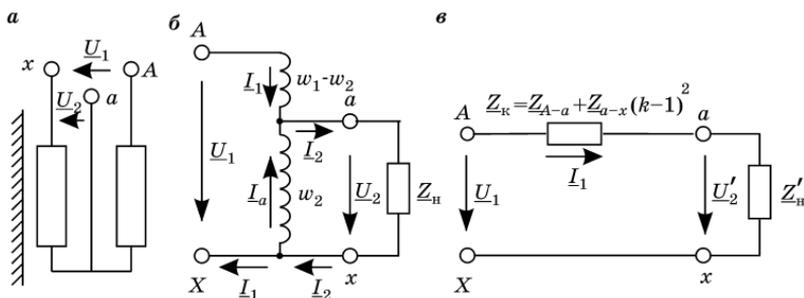


Рис. 2.41

Расположение обмоток относительно стержня, схема соединения и упрощенная схема замещения автотрансформатора

ледовательная обмотка — внешняя, так как присоединяется к линии ВН. Общее число витков первичной обмотки w_1 , вторичной (общей) обмотки — w_2 . Коэффициент трансформации автотрансформатора $k = w_1/w_2$.

Без учета малой величины тока холостого хода, когда $I_1 w_1 = I_2 w_2$, ток последовательной обмотки:

$$I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_2 \frac{1}{k} = I_2'.$$

Ток в общей обмотке:

$$I_{a-x} = I_2 - I_1 = I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right) = I_2'(k - 1).$$

Так как

$$I_{A-a} w_{A-a} = I_1 (w_1 - w_2) = I_1 w_1 - I_1 w_2,$$

то, подставляя $I_1 w_1 = I_2 w_2$, получаем:

$$I_{A-a} w_{A-a} = I_2 w_2 - I_1 w_2 = (I_2 - I_1) w_2 = I_{a-x} w_{a-x}.$$

Таким образом, в магнитном отношении последовательная и общая обмотки автотрансформатора могут рассматриваться как его первичная и вторичная обмотки с соотношением витков

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 = (w_1 - w_2) / w_2 = k - 1.$$

Сопротивление короткого замыкания автотрансформатора $Z_k = Z_{A-a} + Z_{a-x}(k - 1)^2$ значительно меньше, чем это же сопротивление трансформатора. Следовательно, у автотрансформатора меньше напряжение короткого замыкания и меньше изменение вторичного напряжения при нагрузке.

Номинальная мощность одной фазы автотрансформатора $S_H = U_{2H} I_{2H}$. В отличие от трансформатора в автотрансформаторе только часть энергии передается магнитным полем — трансформаторная часть мощности ($S_{тр}$), остальная же часть мощности передается непосредственно по проводам — электрическая мощность ($S_{эл}$), причем:

$$S_{тр} = U_2 I_{a-x} = U_2 I_2 (1 - 1/k);$$

$$S_{эл} = U_2 I_2 = U_2 I_2 (1 - 1/k) = U_2 I_2 / k.$$

Сопоставим автотрансформатор и трансформатор одинаковой мощности по КПД.

Электрические потери в трансформаторе, например, при номинальной нагрузке $P_{эл} = (I_{1н})^2 R_1 + (I_{2н})^2 R_2$.

Электрические потери в автотрансформаторе состоят из потерь в последовательной обмотке и потерь в общей обмотке. Поскольку ток в общей обмотке I_{a-x} составляет лишь часть вторичного тока, и, если принять ту же плотность тока, как и во вторичной обмотке сравниваемого трансформатора, сечение провода общей обмотки автотрансформатора можно уменьшить в $(1 - 1/k)$ раз, что повлечет увеличение во столько же раз активного сопротивления этой обмотки. С учетом сказанного, электрические потери в обмотках «А-а» и «а-х»:

$$P_{эл. А-а} = I_{1н}^2 R_1 \frac{w_1 - w_2}{w_1} = I_{1н}^2 R_1 (1 - 1/k);$$

$$P_{эл. а-х} = I_{a-x}^2 R_1 \frac{1}{1 - 1/k} = I_{2н}^2 R_2 (1 - 1/k).$$

Соотношение потерь в обмотках автотрансформатора и трансформатора:

$$(P_{эл. А-а} + P_{эл. а-х}) P_{эл} = 1 - 1/k.$$

Таким образом, электрические потери в автотрансформаторе ниже, чем в трансформаторе. Если еще учесть, что только часть энергии передается магнитным путем, то меньше будут и потери в стали.

Недостатки автотрансформаторов в электрической связи обмоток ВН и НН и в низком значении напряжения короткого замыкания $u_k\%$.

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжения холостого хода		Условное обозначение
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				У _н авто/Д-0-11

Рис. 2.42

Группа соединения обмоток автотрансформатора

Электрическая связь между обмотками приводит к тому, что при замыкании на землю одной из линий ВН линия НН, обмотка НН и вся аппаратура на этой стороне оказывается под повышенным напряжением относительно земли.

Низкое значение напряжения короткого замыкания характеризует большие токи короткого замыкания, следовательно и значительные механические усилия, действующие на обмотку при возможном коротком замыкании.

Группа соединения обмоток автотрансформатора показана на рисунке 2.42.

2.12. МАРКИРОВКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Маркировка трансформаторов состоит из буквенной и цифровой части. Первая буква Т или О обозначает число фаз. Если перед этими буквами стоит другая буква, то трансформатор специального назначения. Например, АТ — автотрансформатор трехфазный. После буквы Т или О стоит буква (или буквы), обозначающая систему охлаждения. На третьем месте стоит буква, обозначающая особенность данного трансформатора, например: Т — трехобмоточный; Н — регулирование напряжения под нагрузкой. Если в обозначение входят еще буквы, то они характеризуют особенности конструкции магнитопровода и назначение трансформатора, например, грозоупорный.

Цифровая часть указывает номинальную мощность трансформатора в кВА и класс напряжения стороны ВН в кВ. Кроме того, дополнительно стоящие цифры могут указывать климатическое исполнение и категорию размещения по ГОСТ 1510.

Примеры маркировки (условных обозначений):

- ТМ-6300/35 — трехфазный трансформатор с системой охлаждения М мощностью 630 кВА и напряжением ВН 35 кВ;
- АТДЦТН-200000/330/110 — автотрансформатор трехфазный с системой охлаждения ДЦ, трехобмоточный, с регулированием напряжения под нагрузкой

мощностью 200 000 кВА, напряжением обмотки ВН 330 кВ и обмотки СН 110 кВ;

- ТМВМ-1000/10 — трехфазный трансформатор с системой охлаждения М, с пространственной витой магнитной системой номинальной мощностью 1000 кВА и напряжением ВН 10 кВ;
- ТСЗ-100/10 — трехфазный трансформатор, сухой с естественным воздушным охлаждением при защищенном исполнении, мощностью 100 кВА и напряжением 10 кВ.

Значение номинальной мощности трансформаторов — 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 4000 кВА и т. д.

Значение номинального линейного напряжения для обмоток ВН — 6, 10, 20, 35, 110, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ, для обмоток НН — 0,23; 0,4; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 11 кВ.

Отметим, что разновидностью трехфазных трансформаторов являются и трансформаторы с расщепленными на две (или более) части обмотками НН, что позволяет присоединять к трансформатору две или более независимые нагрузки. Номинальные напряжения ветвей одинаковы, а мощности в сумме равны мощности обмотки ВН.

2.13. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Включение трансформатора в сеть. При включении ненагруженного трансформатора в сеть считаем, что подводимое напряжение синусоидально и магнитная система трансформатора не насыщена. Уравнение напряжения трансформатора

$$u_1 = i_1 R_1 + w_1 \frac{d\Phi_1}{dt},$$

где u_1 , i_1 , $\Phi_1 = (\Phi + \Phi_{\sigma 1})$ — мгновенные значения напряжения, тока и полного потока.

Учитывая, что индуктивность первичной обмотки

$$L_1 = w_1 \Phi_1 / i_1,$$

уравнение можно переписать так:

$$\frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{R_1}{L_1}\Phi_1 = \frac{u_1}{w_1} = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \psi),$$

где U_{1m} — амплитуда напряжения; ψ — угол, определяющий значение u_1 в момент включения трансформатора (при $t = 0$).

Решение уравнения состоит из принужденного потока с фазовым сдвигом при включении $\arctg(x_{L1}/R_1)$:

$$\Phi_1 = \Phi_{1m} \sin\left(\omega t + \psi - \arctg \frac{x_{L1}}{R_1}\right)$$

и свободного потока

$$\Phi_1 = Ce^{-\frac{R_1}{L_1}t}.$$

Таким образом,

$$\Phi_1 = \Phi_{1m} \sin\left(\omega t + \psi - \arctg \frac{x_{L1}}{R_1}\right) + Ce^{-\frac{R_1}{L_1}t}.$$

При $t = 0$ произвольная постоянная

$$C = -\Phi_{1m} \sin\left(\psi - \arctg \frac{x_{L1}}{R_1}\right),$$

и решение уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi_1 = & \Phi_{1m} \sin\left(\omega t + \psi - \arctg \frac{x_{L1}}{R_1}\right) - \\ & - \Phi_{1m} \sin\left(\psi - \arctg \frac{x_{L1}}{R_1}\right) e^{-\frac{R_1}{L_1}t}. \end{aligned}$$

Вторая часть уравнения, являясь аperiodической составляющей потока Φ_1 , при возрастании t стремится к нулю. Следовательно, после переходного процесса, время которого определяется практически $(4-5)T$, поток изменяется по гармоническому закону, где $T = L_1/R_1$ — постоянная времени контура из L_1 и R_1 .

Величина апериодической составляющей потока зависит от момента времени, когда произошло включение трансформатора.

Если $\psi - \arctg(x_{L1}/R_1) = 0$, т. е. $\psi = \arctg(x_{L1}/R_1)$, то апериодическая составляющая отсутствует, и процесс с самого начала протекает как установившийся. Это соответствует включению трансформатора в сеть в момент прохождения напряжения приблизительно через максимальное значение, так как, учитывая, что $x_{L1} \gg R_1$, $\psi = \arctg(x_{L1}/R_1) \approx \pi/2$.

Если $\psi = \arctg(x_{L1}/R_1) = \pi/2$, $\psi = \arctg(x_{L1}/R_1) + \pi/2 = \pi$, апериодическая составляющая имеет максимальное значение. Это соответствует включению трансформатора в сеть в момент прохождения напряжения через нулевое значение. В этом случае практически через полпериода ($\omega t = \pi$) поток будет наибольшим:

$$\Phi_{1\text{наиб}} = -\Phi_{1m} - \Phi_m e^{-\frac{R_1 \pi}{L_1 \omega}} = -\Phi_{1m} \left(1 + e^{-\frac{R_1 \pi}{L_1 \omega}}\right) \approx -2\Phi_{1m}.$$

Таким образом, по истечении полупериода после неблагоприятного включения трансформатора в сеть ($\psi = 0$) наибольшая величина потока примерно в два раза больше амплитуды установившегося потока (рис. 2.43).

В насыщенных трансформаторах увеличение магнитного потока вдвое приведет к многократному (в десятки раз) возрастанию тока включения по сравнению с установившимся током холостого хода. В мощных трансформаторах постоянная времени T довольно велика и затухание апериодической составляющей потока может длиться несколько секунд. Непосредственно для трансформатора ток включения особой опасности не представляет, однако он может привести к отключению его от сети релейной защитой. Следовательно, релейная защита или другая защитная аппаратура должна быть рассчитана так, чтобы можно было избежать ложных отключений трансформатора при его включении в сеть.

Физически появление апериодической составляющей потока можно объяснить принципом непрерывности во

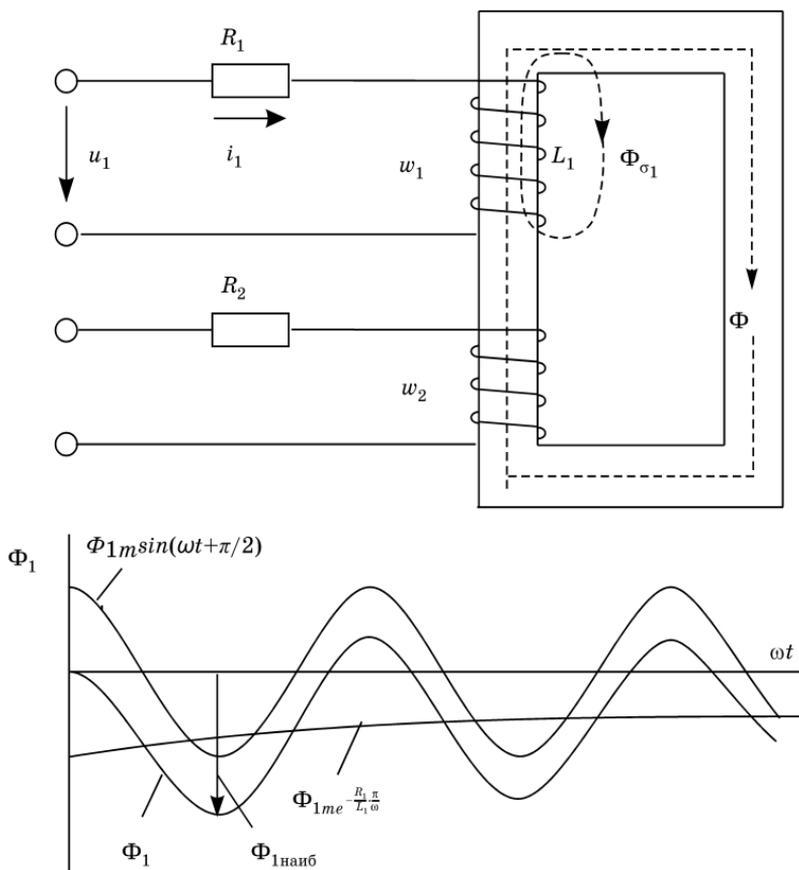


Рис. 2.43

Схема изменения потока при включении ненагруженного трансформатора в сеть в момент прохождения напряжения через нулевое значение

времени потокосцепления обмотки ψ_1 . Невозможность скачкообразного изменения потокосцепления следует из того, что в противном случае на индуктивности L_1 появилось бы бесконечно большое напряжение $U_{L1} = d\psi_1/dt$, что лишено физического смысла. Принцип непрерывности потокосцепления означает, что в начальный момент включения поток в трансформаторе должен быть таким же, каким он был перед включением трансформатора, а затем плавно изменяется.

Внезапное короткое замыкание трансформатора. При внезапном коротком замыкании, также предполагая, что напряжение, подводимое к трансформатору синусоидально, согласно упрощенной схеме замещения (рис. 2.44):

$$u_1 = i_k R_k + L_k \frac{di_k}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \psi),$$

где L_k — индуктивность от потоков рассеяния; ψ — фаза напряжения при коротком замыкании.

Потокам рассеяния в силовых трансформаторах основное сопротивление оказывает немагнитная среда, следовательно, L_k — величина постоянная. Решение уравнения относительно тока:

$$i_k = I_{km} \sin\left(\omega t + \psi - \arctg \frac{x_{L_k}}{R_k}\right) - I_{km} \sin\left(\psi - \arctg \frac{x_{L_k}}{R_k}\right) e^{-\frac{R_k t}{L_k}}$$

или

$$i_k = I_{km} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - I_{km} \sin(\psi - \varphi_k) e^{-\frac{R_k t}{L_k}}.$$

Наиболее благоприятные условия короткого замыкания имеют место, когда $\psi - \varphi_k = 0$, т. е. когда $\psi = \varphi_k$. В этом случае аperiodическая составляющая тока отсутствует, и ток короткого замыкания изменяется по закону $i_{km} = I_{km} \sin \omega t$. Так как короткое замыкание происходит при номинальном напряжении, то

$$I_{km} = \frac{100\sqrt{2}}{u_k \%} I_{1н},$$

где $u_k \%$ — напряжение короткого замыкания трансформатора.

Если короткое замыкание наступает, когда $\psi = -\varphi_k = \pi/2$, то по истечении полупериода ($\omega t = \pi$) с момента начала короткого замыкания ток достигает своего наибольшего значения:

$$i_{k.наиб} = -I_{km} - I_{km} e^{-\frac{R_k \pi}{L_k \omega}} = I_{km} \left(1 + e^{-\frac{R_k \pi}{L_k \omega}}\right).$$

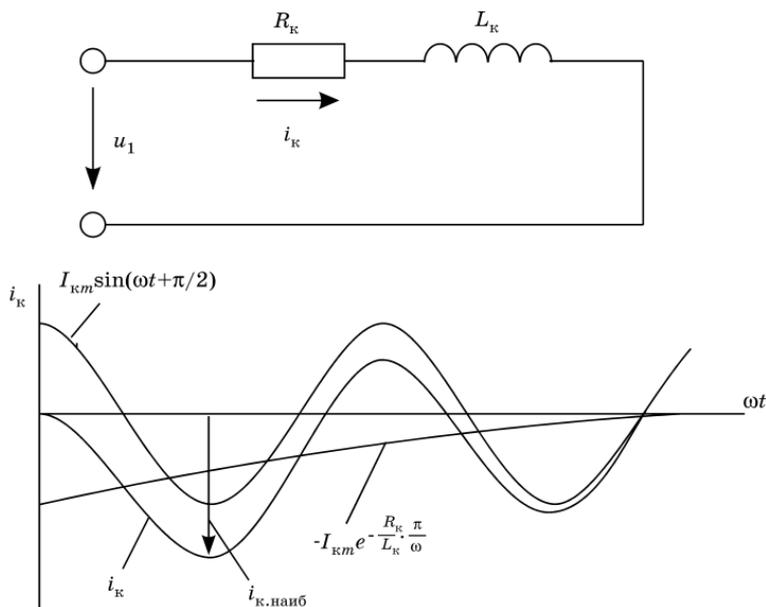


Рис. 2.44

Схема замещения трансформатора и изменение тока при коротком замыкании в момент прохождения напряжения через нулевое значение

После переходного процесса, продолжающегося $(4-5)T$, где постоянная времени $T = L_k/R_k$, ток короткого замыкания изменяется практически по периодическому закону. В трансформаторах большой мощности, у которых $R_k/(\omega L_k) \leq 0,1$, процесс затухания аperiodической составляющей длительный. Отношение токов

$$\frac{i_{k.\text{наиб}}}{I_{km}} = 1 + e^{-\frac{R_k}{L_k} \frac{\pi}{\omega}} = k_y$$

называется ударным коэффициентом короткого замыкания. Для трансформаторов различной мощности $k_y = 1,2-1,85$.

Значение наибольшего тока короткого замыкания следует учитывать при выборе защитной аппаратуры, проверяя ее на механическую и термическую устойчивость. Кроме того, действие этого тока должно учитываться при расчете механической прочности обмоток и магнитопровода трансформатора.

2.14. ТРАНСФОРМАТОРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК, СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформаторы выпрямительных установок. В различных отраслях применение находят выпрямительные установки с твердыми выпрямителями (полупроводниковыми вентилями). Как правило, схемы таких установок включают в себя трансформаторы, понижающие подводимое к вентилям напряжение. Некоторые из схем выпрямления приведены на рисунке 2.45.

Схема соединения вентилей	Схема выпрямления	Форма выпрямленного напряжения	1. Соотношение между выпрямленным напряжением и переменным 2. Амплитуда обратного напряжения на вентиле
	 Однополупериодная		$U_B = 0,45 U_2$ $U_{м.обр} = 1,41 U_2$
	 Со средней точкой		$U_B = 0,9 U_2$ $U_{м.обр} = 2,82 U_2$
	 Однофазная мостовая		$U_B = 0,9 U_2$ $U_{м.обр} = 1,41 U_2$
	 Трехфазная с нулевым выводом		$U_B = 1,17 U_2$ $U_{м.обр} = 2,44 U_2$
	 Трехфазная мостовая		$U_B = 2,34 U_2$ $U_{м.обр} = 2,44 U_2$

Рис. 2.45
Схемы выпрямления переменного тока

Включение вентиляей оказывает существенное влияние на трансформатор, так как приводит к искажению формы кривой тока в его обмотках. В некоторых случаях, например для однополупериодной схемы выпрямления и для трехфазной с нулевым выводом, приводит к появлению в магнитопроводе трансформатора магнитного потока, неизменного по величине и направлению.

Исходя из особенностей работы выпрямительных трансформаторов, паспортные данные их несколько отличаются от паспортных данных силовых трансформаторов.

Номинальной мощностью выпрямительного трансформатора называется мощность его первичной обмотки. Номинальным вторичным напряжением выпрямительного трансформатора $U_{2н}$ называется напряжение вторичной обмотки между нейтральным (нулевым) и фазным выводом при холостом токе трансформатора. Мощность вторичной обмотки P_2 определяется как произведение номинального вторичного напряжения $U_{2н}$ на действующее значение тока во вторичной обмотке I_2 при полной нагрузке на стороне выпрямленного тока. Номинальными значениями выпрямленного напряжения U_B и тока I_B называются напряжение и ток при полной нагрузке выпрямителя. Типовой мощностью выпрямительного трансформатора называется полусумма мощностей первичной и вторичной обмоток.

Значительное влияние на форму тока в обмотках выпрямительного трансформатора оказывает характер нагрузки на выпрямитель. Если выпрямитель нагружен только активным сопротивлением, то выпрямительный ток имеет такую же форму, как и выпрямленное напряжение. При активно-индуктивной нагрузке длительность протекания тока увеличивается, а отношение амплитуды тока к среднему его значению уменьшается. При активно-емкостной нагрузке длительность протекания тока через обмотки уменьшается, а соотношение между амплитудными и средними значениями токов увеличивается по сравнению со случаем активной нагрузки.

Сварочные трансформаторы. Сварочные трансформаторы предназначены для питания электрической дуги при

сварке, резке или наплавке металлов однофазным переменным током. Они включаются в сеть напряжением 220 или 380 В. При сварке на малых токах (80–100 А) для устойчивого горения дуги вторичное напряжение при холостом ходе должно составлять 70–80 В.

Сварочные трансформаторы изготавливают в однокорпусном исполнении. Обмотки трансформатора и реактора размещены на общей магнитной системе и закрыты кожухом. Основные конструктивные элементы сварочного трансформатора показаны на рисунке 2.46. Сердечник трансформатора имеет стержни, а также нижнее (НЯ), среднее (СЯ), верхнее (ВЯ) ярма и подвижной пакет стали ПП с регулятором Р. Первичная w_1 и вторичная w_2 обмотки расположены на боковых стержнях в виде коаксиальных цилиндрических катушек. Реактивная катушка w_L включена последовательно и встречно с вторичной обмоткой w_2 .

Магнитный поток Φ замыкается в основном через среднее ядро, и лишь незначительная его часть — через верхнее ядро и подвижной пакет. Магнитный поток Φ_L от $I_2 w_L$ замыкается в основном через среднее ядро и регулируемый воздушный зазор l_δ .

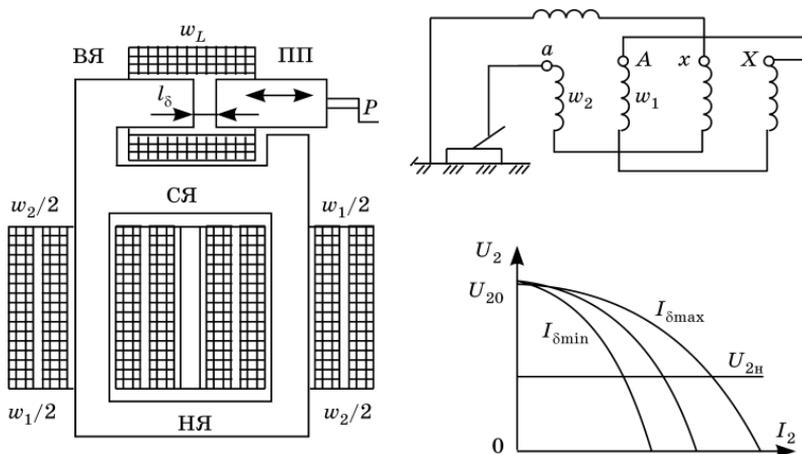


Рис. 2.46

Принципиальная конструкция сердечника, схема соединения обмоток и внешние характеристики сварочного трансформатора

Регулирование тока I_2 осуществляется плавным изменением величины l_δ , т. е. изменением магнитного потока Φ_L и, следовательно, магнитного состояния среднего ярма. Регулировочные характеристики $I_2 = f(l_\delta)$ близки к линейным характеристикам.

Вторичное напряжение холостого хода сварочного трансформатора чаще всего имеет две ступени, для установления которых служат дополнительные витки вторичной обмотки. К переключениям на повышенное напряжение холостого хода прибегают при значительных снижениях напряжения питающей сети, больших падениях напряжения и длинных соединительных проводах.

Вид внешних характеристик сварочного трансформатора (рис. 2.46) показан при минимальном ($l_{\delta\min}$) и максимальном ($l_{\delta\max}$) воздушном зазоре реактора. На рисунке U_{20} — напряжение холостого хода, $U_{2н}$ — номинальное рабочее напряжение сварочного трансформатора.

2.15. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В высоковольтных установках непосредственные измерения электрических величин, необходимые для контроля режима работы установок или сетей, представляют опасность для обслуживающего персонала. Кроме того, измерительные приборы на высокие напряжения получили бы громоздкими и дорогостоящими.

Эти трудности устраняются путем применения измерительных трансформаторов тока и напряжения, которые понижают измеряемые величины до приемлемых для измерения значений.

Большинство трансформаторов тока выполняют на номинальный вторичный ток $I_{2н} = 5$ А при номинальном первичном токе до $I_{1н} = 15\,000$ А. Первичная обмотка включается в контролируемую цепь последовательно (см. рис. 2.47), во вторичную обмотку включена нагрузка — токовые обмотки измерительных приборов. Трансформаторы тока работают в режиме, близком к режиму короткого замыкания.

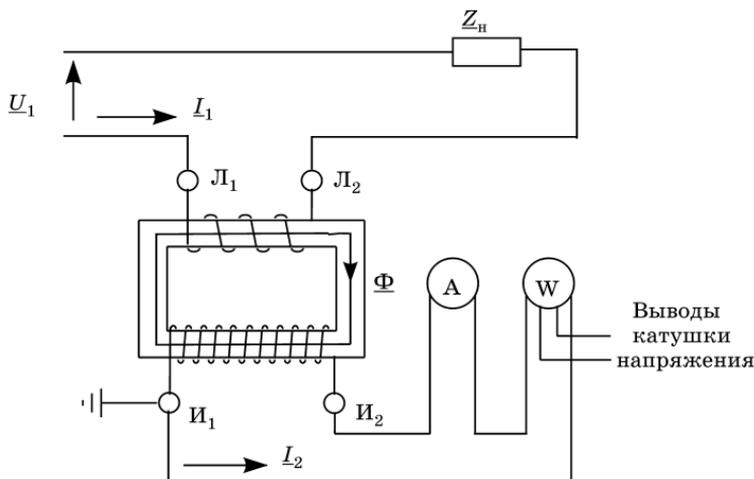


Рис. 2.47

Схема включения измерительного трансформатора тока

Отношение

$$I_{1н}/I_{2н} = w_2/w_1 = k_i$$

называется коэффициентом трансформации трансформатора тока.

Относительная разница в процентах между умноженным на коэффициент трансформации током, измеренным прибором, и действительным током, протекающим по первичной обмотке,

$$\Delta i\% = \frac{k_i I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100$$

называется погрешностью по току.

Кроме погрешности по току трансформатор тока имеет и погрешность по углу, представляющей угол сдвига между вектором первичного тока и повернутым на 180° вектором вторичного тока.

Для уменьшения токовой и угловой погрешности трансформатора тока необходимо уменьшить его ток холостого хода. С этой целью магнитную систему делают ненасыщенной и магнитопровод выполняют из высококачественной электротехнической стали.

Номинальная мощность трансформатора тока $S_n = (I_{2n})^2 Z_n$ обычно мала. Внешнее сопротивление Z_n (токовые обмотки измерительных приборов), которому соответствует номинальная мощность трансформатора тока, называется *номинальной нагрузкой*.

По величине максимально возможных погрешностей в номинальном режиме работы трансформаторы тока относят к различным классам точности (табл. 2.7).

Трансформаторы тока выполняют однофазными на разные классы точности. Классу точности 0,2 должны удовлетворять лабораторные трансформаторы тока. Для промышленных измерений применяют трансформаторы тока с классом точности 0,5 и 1,0, для целей релейной защиты — 1,0 и 3,0.

При включении трансформатора тока в сеть нельзя оставлять вторичную обмотку разомкнутой или размыкать ее при работе. В этом случае трансформатор тока из режима, близкого к короткому замыканию, попадает в режим холостого хода. По кривой намагничивания для стали сердечника можно легко убедиться в том, что индукция в стали, обусловленная теперь МДС первичной обмотки, не уравновешенной МДС с вторичной стороны, возрастает во много раз. Соответственно этому резко возрастают потери в стали, что может вызвать перегрев сердечника и повреждение изоляции вторичной обмотки. Кроме того, в результате сильного насыщения магнитопровода кривая потока отличается от синусоидальной формы. На зажимах вторичной разомкнутой обмотки индуцируется этим потоком напряжение, имеющее резко пикообразный характер. В многоамперных трансформаторах тока эти пики могут представлять опасность для обслуживающего персонала.

Таблица 2.7

Классы точности трансформаторов тока

Класс точности	0,2	0,5	1,0	3,0
Погрешность по току, %	±0,2	±0,5	±1,0	±3,0
Угловая погрешность, мин	±10	±40	±80	—

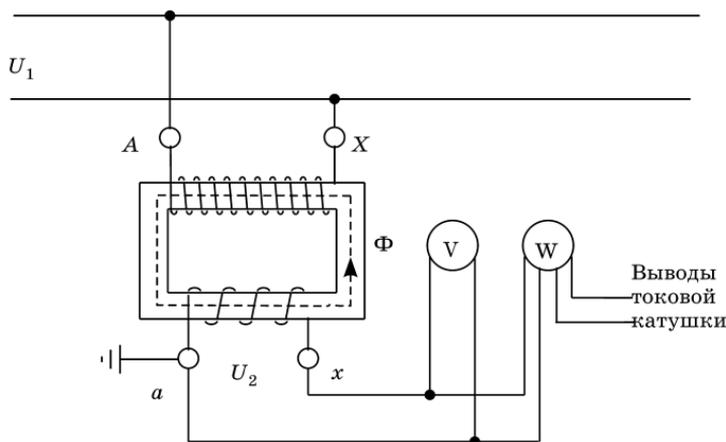


Рис. 2.48

Схема включения измерительного трансформатора напряжения

Измерительные трансформаторы напряжения. Измерительные трансформаторы напряжения изготовляют на номинальное вторичное напряжение 100, 100/1,73 и 100/3 В при номинальном первичном напряжении от 0,38 до 1150 кВ. Они предназначены для питания цепей напряжения измерительных приборов (рис. 2.48), поэтому режим их работы близок к режиму холостого хода.

Погрешность по напряжению в процентах:

$$\Delta u\% = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100,$$

где k_n — номинальный коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения, представляющий собой отношение первичного номинального напряжения к вторичному номинальному напряжению,

$$k_n = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} \approx \frac{w_1}{w_2} \approx k.$$

Угловая погрешность определяется углом между векторами первичного напряжения и повернутым на 180° вектором вторичного напряжения. Для уменьшения погрешностей магнитную систему выполняют без насыщения.

Таблица 2.8

Классы точности трансформаторов напряжения

Класс точности	0,2	0,5	1,0	3,0
Погрешность по напряжению, %	±0,2	±0,5	±1,0	±3,0
Угловая погрешность, мин	±10	±20	±40	±10

Измерительные трансформаторы напряжения выпускают однофазными на любое первичное напряжение, а также трехфазными при первичном напряжении $U_1 \leq 20$ кВ. В отличие от трансформаторов тока измерительные трансформаторы напряжения не изготавливают на различные классы точности, а один и тот же трансформатор может работать в различных классах в зависимости от величины нагрузки (табл. 2.8).

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

3.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО

Асинхронной называют электрическую машину переменного тока, у которой в установившемся режиме работы частота вращения ротора не совпадает с частотой вращения магнитного поля.

Принцип действия асинхронной машины основан на электромагнитном взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами проводников статорной и роторной обмотки.

Если во вращающееся магнитное поле поместить замкнутый проводник в виде рамки, укрепленной на оси, то магнитное поле при вращении пересечет стороны рамки, наведет в них ЭДС, которая создаст в рамке ток. Магнитное поле тока рамки, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, приведет рамку во вращение в направлении вращения магнитного поля. При приближении частоты вращения рамки к частоте вращения магнитного поля скорость изменения пронизывающего рамку магнитного потока уменьшается, следовательно, уменьшается наводимая в рамке ЭДС и ток в рамке. Если допустить, что частота вращения рамки достигла частоты вращения магнитного поля, то ЭДС и ток в рамке будут равны нулю. Момент сил, действующих на рамку, также станет равным нулю. Под действием сил трения рамка начнет останавливаться. С уменьшением частоты вращения рамки снова возрастает скорость изменения магнитного поля, следовательно, и вращающий момент, который в итоге при равномерном вращении рамки будет равен моменту сопротивления.

Таким образом, частота вращения n_2 рамки всегда меньше частоты вращения магнитного поля n_1 .

Этот принцип взаимодействия вращающегося магнитного поля с током рамки определяет двигательный режим работы асинхронной машины.

Если же с помощью какого-либо, например механического приводного устройства, рамку заставить вращаться быстрее магнитного поля, то ЭДС и ток в рамке изменят знак. Сила взаимодействия тока рамки с магнитным полем будет противодействовать приводному устройству.

Этот принцип взаимодействия вращающегося магнитного поля с током рамки определяет генераторный режим работы асинхронной машины.

Основным режимом работы асинхронной машины является двигательный режим. В асинхронном двигателе вращающееся магнитное поле создают токи статорной обмотки, включенной в электрическую сеть. Магнитопровод двигателя образуют сердечники статора и ротора, набранные из штампованных листов электротехнической стали с пазами для обмоток. Роль замкнутых рамок исполняет литая из алюминия в виде беличьей клетки обмотка ротора (короткозамкнутые двигатели, рис. 3.1) или

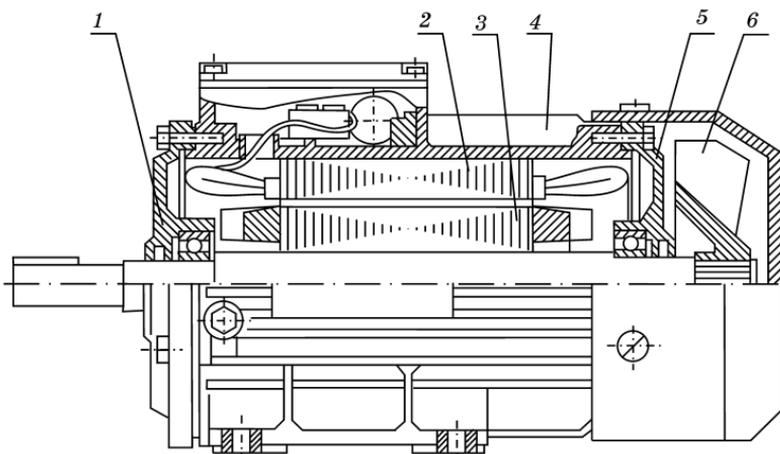


Рис. 3.1

Устройство короткозамкнутого двигателя:

1, 5 — щиты подшипниковые; 2 — статор; 3 — ротор; 4 — станина; 6 — вентилятор.

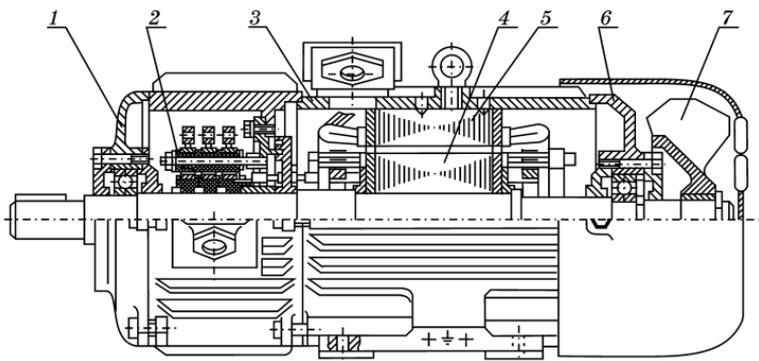


Рис. 3.2

Устройство двигателя с фазным ротором:

1, 6 — щиты подшипниковые; 2 — щеткодержатель; 3 — станина; 4 — ротор; 5 — статор; 7 — вентилятор.

подобная статорной обмотке обмотка ротора из катушек медного провода (двигатели с фазным ротором или с контактными кольцами, рис. 3.2). У двигателя с фазным ротором выводы от роторной обмотки соединены с контактными кольцами, расположенными на валу, к которым посредством токосъемных щеток подключают добавочные сопротивления для ограничения пускового тока, увеличения пускового момента, а также и для регулирования в определенном диапазоне частоты вращения.

Относительная разность частот вращения магнитного поля n_1 и ротора n_2 называется скольжением ротора $s = (n_1 - n_2)/n_1$.

3.2. СЕРИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Широкое применение, а также развитие международной торговли привело к необходимости стандартизации электродвигателей, как национальной, так и международной. Международная стандартизация осуществляется международной электротехнической комиссией — МЭК (International Electrotechnical Commission — IEC). В этой связи низковольтные короткозамкнутые асинхронные двигатели общего назначения называют стандартными асинхронными двигателями (рис. 3.3). Их выпускают в

виде единых серий с определенной шкалой номинальной мощности и высоты оси вращения (габарита). *Номинальной мощностью* называют мощность на валу в режиме работы, для которого двигатель предназначен заводом изготовителем.

Шкала номинальной мощности двигателей отечественных единых серий 4А, АИР, 5А, А, 6А, 7А: 0,06–0,09–0,12–0,18–0,25–0,37–0,55–0,75–1,1–1,5–2,2–3–4–5,5–7,5–11–15–18,5–22–30–37–45–55–75–90–110–132–160–200–250–315 кВт.

Шкала высоты оси вращения: 56–63–71–80–90–100–112–132–160–180–200–225–250–280–315–355 мм.

Степень защиты двигателей обозначается буквами IP (International Protection) и двумя цифрами. Основные исполнения:

- закрытое обдуваемое IP44 — внутрь двигателя не могут попасть твердые тела размером более 1 мм. Вода, разбрызгиваемая на двигатель, не оказывает на него вредного действия;
- закрытое обдуваемое IP54 — проникновение внутрь двигателя пыли не предотвращено полностью, однако не в количестве, достаточном для нарушения его работы. Вода, разбрызгиваемая на двигатель, не оказывает вредного действия.

Двигатели могут изготавливаться для эксплуатации в макроклиматических районах (ГОСТ 15150) (см. табл. 3.1): У — с умеренным климатом, Т — с тропическим климатом, ОМ — с морским климатом, а также в условиях, определяемых категориями размещения: 1 — на открытом воздухе, 2 — под навесом при отсутствии прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков, 3 — в закрытых помещениях без искусственного регулирования климатических условий, 5 — в помещениях с повышенной влажностью.



Рис. 3.3
Вид стандартного асинхронного двигателя

Таблица 3.1

**Климатическое исполнение
и категория размещения двигателей**

Климатическое исполнение	Категория размещения	Рабочая температура	
		верхнее значение	нижнее значение
У	1 или 2	+40	-45
У	3	+40	-45
Т	2	+50	-40
ОМ	2	+45	-10

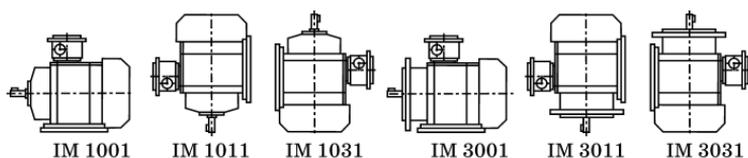


Рис. 3.4

Обозначения монтажных исполнений двигателей

У двигателей предусмотрены три установочные длины станины S, L, M, две длины сердечника статора А и В, разные монтажные исполнения групп (ГОСТ 2479): IM1 — двигатели на лапах; IM2 — двигатели на лапах с фланцем; IM3 — двигатели без лап с фланцем и др. (рис. 3.4). Основные монтажные исполнения групп IM1001, IM2001, IM3001, IM2101, IM3601. Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, четвертая — исполнение конца вала (1 — с одним цилиндрическим, 2 — с двумя цилиндрическими, 3 — с одним коническим).

Примеры обозначения асинхронных двигателей основной модификации по климатическому исполнению и категории размещения У3:

- АИР180S2У3 — двухполюсный асинхронный двигатель серии АИР высотой оси вращения 180 мм и длиной станины S;
- А100L4У3 — четырехполюсный асинхронный двигатель серии А высотой оси вращения 100 мм и длиной станины L;
- 5А132М6У3 — шестиполюсный асинхронный двигатель серии 5А высотой оси вращения 200 мм и длиной станины М.

В сериях предусмотрен и ряд модификаций двигателей:

- *двигатели с повышенным скольжением* для привода оборудования с относительно большими инерционными массами, неравномерной нагрузкой, большой частотой пусков и реверсов (пример обозначения АИРС90L6УЗ);
- *двигатели с повышенным пусковым моментом* для привода машин и механизмов с большими статическими и динамическими моментами — транспортеров, центрифуг, сепараторов и т. п. (пример обозначения АИРР160L4УЗ);
- *многоскоростные двигатели* (примеры обозначения АИР90L4/2УЗ, АИР200L121/8/6/4УЗ);
- *двигатели со встроенным электромагнитным тормозом* для быстрого торможения при отключении питания. При подаче напряжения на двигатель происходит его растормаживание. Тормозная система приводится в действие электромагнитом постоянного тока, который питается от сети через выпрямитель (примеры обозначения АИР112S4ЕЭУЗ, АИР100S8/2ЕЭУЗ);
- *двигатели со встроенными терморезисторами* для защиты статорной обмотки от недопустимого перегрева (пример обозначения — АИР80А2БУЗ);
- *двигатели однофазные* с рабочим конденсатором (пример обозначения АИРЕ56А2УЗ), с пусковым конденсатором (пример обозначения АИРУ56А2УЗ), с пусковым и рабочим конденсаторами (пример обозначения АИРУЕ71А4УЗ);
- *другие модификации* (повышенной точности по установочным размерам, для моноблочных насосов, пожароустойчивые).

Двигатели выпускают и узкоспециализированными сериями, например, крановые, тяговые, сельскохозяйственного исполнения.

Двигатели сельскохозяйственного исполнения серии ДА небольшой мощности выпускаются в исполнении для работы при относительной влажности до $95 \pm 3\%$. Они рассчитаны на возможное попадание воды и снега, длительное содержание химически активных примесей в воздухе (аммиак, сероводород). Двигатели устойчивы против струи

дезинфицирующего раствора, воздействия аэрозолей продолжительностью до 24 ч (с последующим обмывом двигателя), могут эксплуатироваться в окружающей среде, содержащей летучую соломистую или хлопьевидную пыль.

Номинальные данные двигателей основного исполнения приводятся в каталогах для продолжительного режима работы S1 (ГОСТ 183), а для двигателей с повышенным скольжением — для режима работы S3 и продолжительности включения 40% (ПВ = 40%). Продолжительность включения указывает на продолжительность работы двигателя во временном цикле, как правило, равном 10 мин. Для двигателей с электромагнитным тормозом номинальные данные соответствуют режиму работы S4 и ПВ = 40% (для двухскоростных двигателей ПВ = 40/15%).

Таблица 3.2

Нагревостойкость изоляционных материалов

Класс нагревостойкости изоляции	Температурный индекс материала, °С
B	130
F	155
H	180

Таблица 3.3

Проводниковые и изоляционные материалы двигателей

Наименование элемента	Наименование материала
Провод обмоточный	Провод ПЭТ-155, ПЭТМ-155, ПЭТД-180
Провод выводной	Провод ПВКФ-660, ПВФС-660, ПВКВ-660
Изоляция пазовая	Пленка полиэтилентерефталатная ПЭТ-Э
	Синтофлекс 818 (ПСКА-М)
	Стеклотекстолит СТЭФ
Изоляция межфазовая	Стеклолакоткань ЛСК-155/180
	Стеклопленкослюдопласт ГИП-ЛСП-ПЛ(в)
Бандаж лобовых частей	Шнур-чулок АСЭЧ(б)
Изоляция паек и концов катушек	Стеклолакоткань ЛСК-155/180
	Трубка 133, ТКСП, трубка 203, ТКР
Лак пропиточный	Лак полиэфирный ПЭ-9153М

Асинхронные двигатели российских серий соответствуют уровню мирового электромашиностроения. Температурный запас изоляции обеспечивает ресурс статорных обмоток не менее 20 000 ч. Повышению ресурса способствовало применение изоляции класса нагревостойкости F при превышении температуры обмоток, соответствующем классу нагревостойкости B (табл. 3.2, 3.3). Предельно допустимое превышение температуры изоляционных материалов получается вычитанием из температурного индекса материала изоляции номинальной температуры окружающей среды (для зоны умеренного климата 40°C).

3.3. МАГНИТОДВИЖУЩАЯ СИЛА И СХЕМЫ ОБМОТОК

Статорная обмотка трехфазного ($m = 3$) асинхронного двигателя на p пар полюсов состоит из катушечных групп с числом катушек в группе $q = Z/2pt$ (Z — число пазов статора). Элементарной частью статорной обмотки является проводник. Магнитное поле тока i проводника замыкается по статору и через воздушный зазор δ между статором и ротором (рис. 3.5). При условном радиусе замыкающейся по статору линии магнитного поля $r = 1$ напряженность магнитного поля (ее тангенциальная составляющая) в статоре:

$$H_t = \frac{i}{2\pi}.$$

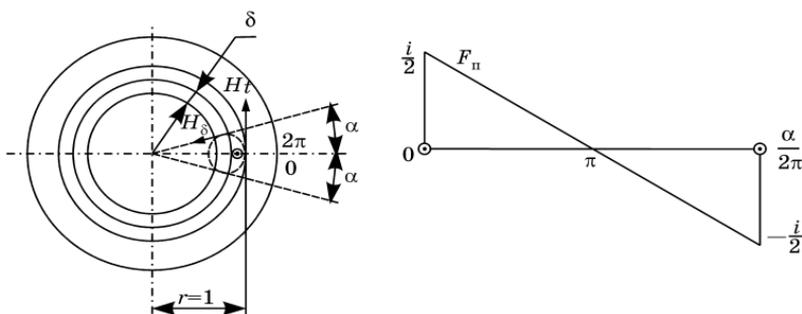


Рис. 3.5
МДС тока проводника

Для линии магнитного поля, замыкающейся через воздушный зазор:

$$2H_{\delta}\delta + 2H_t\alpha = 2H_{\delta}\delta + 2\alpha \frac{i}{2\pi} = i,$$

откуда радиальная составляющая напряженности магнитного поля:

$$H_{\delta} = \frac{i}{2\delta} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right).$$

Таким образом, МДС тока проводника, приходящаяся на воздушный зазор,

$$F_{\delta} = H_{\delta}\delta = \frac{i}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) = F_n.$$

Вид МДС тока i витка при диаметральном расположении составляющих витков проводников, а также вид магнитного потока, созданного МДС, показан на рисунке 3.6.

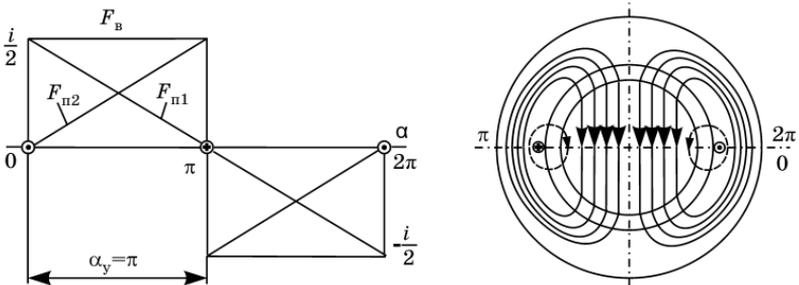


Рис. 3.6
МДС тока витка и вид магнитного потока

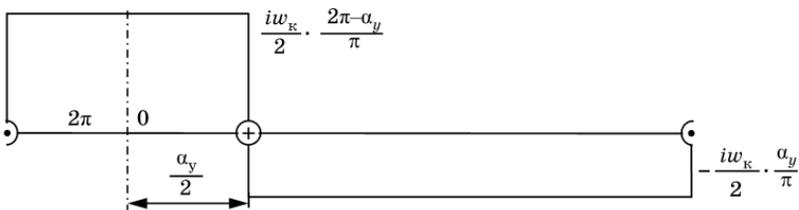


Рис. 3.7
МДС тока катушки

В общем случае при расстоянии сторон катушки α_y (рис. 3.7) МДС тока i катушки разложением в ряд Фурье можно представить в виде множества гармоник v :

$$F_K = \sum_{v=1}^{\infty} a_{Kv} \cos v\alpha$$

с амплитудами

$$a_{Kv} = \frac{2}{\pi} \left(\int_0^{\frac{\alpha_y}{2}} \frac{i w_K}{2} \cdot \frac{(2\pi - \alpha_y)}{\pi} - \int_{\frac{\alpha_y}{2}}^{\pi} \frac{i w_K}{2} \cdot \frac{\alpha_y}{\pi} \right) \cos v\alpha d\alpha =$$

$$= i w_K \cdot \frac{2}{\pi v} \sin v \frac{\alpha_y}{2}.$$

Для основной или рабочей гармоники $v = p$, определяющей число пар полюсов обмотки и двигателя,

$$a_K = i w_K \cdot \frac{2}{\pi p} \sin p \frac{\alpha_y}{2}.$$

Расстояние между сторонами катушки в пазовых делениях статора α_y/α_1 ($\alpha_1 = 2\pi/Z$ — пазовый угол статора) является шагом катушки y , а выражение

$$\sin p \frac{\alpha_y}{2} = \sin p y \frac{\pi}{Z} = k_y$$

называется коэффициентом укорочения.

Отношение геометрической суммы амплитуд МДС q катушек катушечной группы к арифметической сумме (рисунки 3.8, r — радиус окружности, которую можно

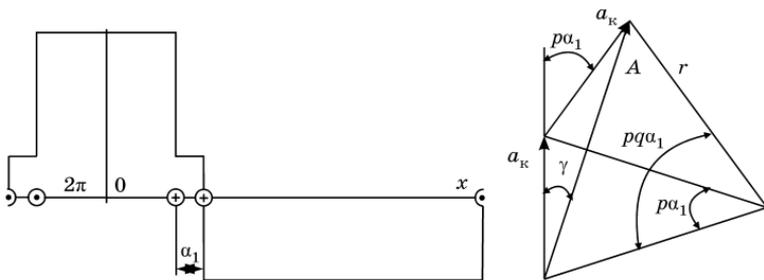


Рис. 3.8
МДС катушечной группы

описать вокруг правильного многоугольника со сторонами α_k)

$$k_p = \frac{A}{qa_k} = \frac{2r \sin pq \frac{\alpha_1}{2}}{q2r \sin p \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin pq \frac{\pi}{Z}}{q \sin p \frac{\pi}{Z}}$$

называется коэффициентом распределения.

Произведение коэффициентов укорочения и распределения составляет обмоточный коэффициент $k_{об} = k_y \cdot k_p$.

Для другой гармоники в формулы вместо p подставляют ν , $k_{об\nu} = k_{y\nu} \cdot k_{p\nu}$.

Катушечные группы, соединенные по определенной схеме, образуют статорную фазную обмотку (рис. 3.9).

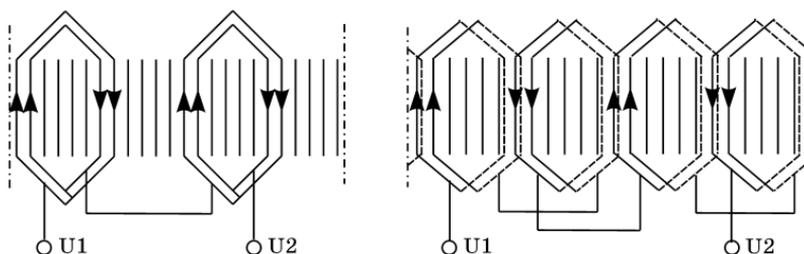


Рис. 3.9

Схемы однослойной и двухслойной фазных обмоток, $2p = 4$

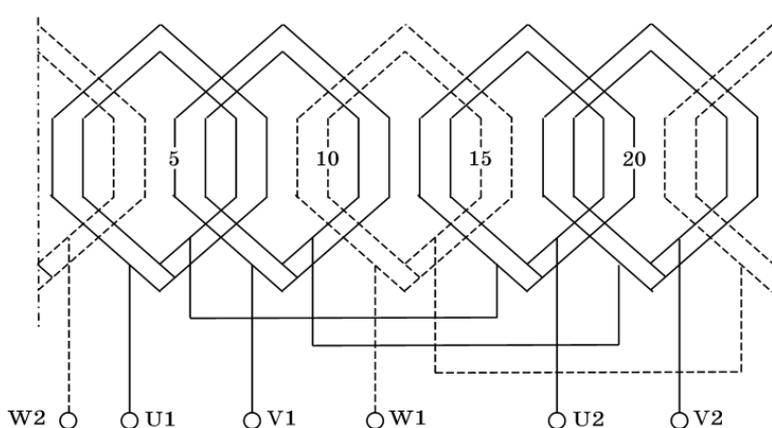


Рис. 3.10

Схема трехфазной обмотки, $2p = 4$

Средний шаг катушек однослойной обмотки, стороны которых занимают всю площадь изолированного паза, равен диаметральному шагу $y_d = Z/2p$. Двухслойные обмотки выполняют с укороченным шагом $y < Z/2p$.

Ток $\sqrt{2}I_1 \sin \omega t$ фазной обмотки с w витками образует пульсирующую МДС:

$$F_{\Phi} = \frac{2\sqrt{2}I_1 w}{\pi} \sin \omega t \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} k_{обv} \cos vx.$$

Круговое вращающееся магнитное поле двигателя создает токи $\sqrt{2}I_1 \sin \omega t$, $\sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - 120^\circ)$, $\sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - 240^\circ)$ трех симметричных фазных обмоток — одинакового распределения со смещением на 120° в масштабе основной гармоники — в электрических градусах (рис. 3.10).

МДС трехфазной обмотки

$$\begin{aligned} F &= \frac{2\sqrt{2}I_1 w}{\pi} \left\{ \sum_v \frac{1}{v} k_{обv} [\sin \omega t \cos vx + \right. \\ &\quad + \sin(\omega t - 120^\circ) \cos \frac{v}{p}(px - 120^\circ) + \\ &\quad \left. + \sin(\omega t - 240^\circ) \cos \frac{v}{p}(px - 240^\circ) \right\} = \\ &= \frac{m\sqrt{2}I_1 w}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{k_{обv}}{v} \sin(\omega t \mp vx), \end{aligned}$$

где знак «-» относится к прямовращающимся гармоникам v , в измерении которых, как и в измерении основной гармоники, фазные обмотки смещены на 120° , а знак «+» относится к обратновращающимся гармоникам v , для которых в том же направлении отсчета фазные обмотки смещены на 240° .

МДС основной гармоники трехфазной обмотки:

$$\frac{m\sqrt{2}I_1 w k_{об}}{\pi p} \sin(\omega t - px) = F_m \sin(\omega t - px).$$

Перемещение основной гармоники МДС, например, за четверть периода тока $\Delta t = T/4 = 1/4f$ (f — частота тока) по внутренней расточке статора на расстояние $\Delta x = \pi/2p$

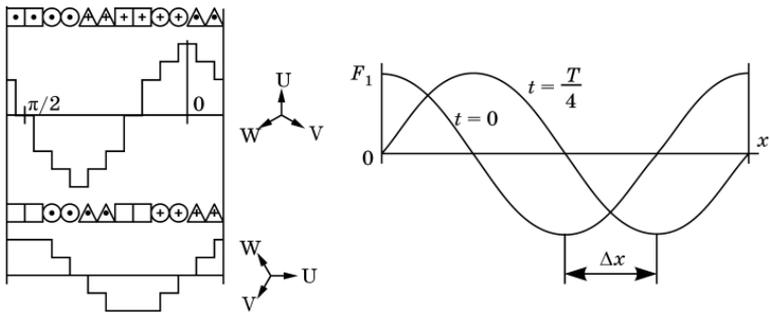


Рис. 3.11

К определению частоты вращения основной гармоники МДС

(рис. 3.11, стороны катушек фазы U обозначены квадратами, фазы V — треугольниками, фазы W — кругами) определяет угловую скорость основной гармоники $\Delta x / \Delta t = 2\pi f / p$ (рад/с) и частоту ее вращения (об/мин):

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Частота вращения ротора (частота вращения асинхронного двигателя):

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s).$$

МДС трехфазной обмотки наряду с основной гармоникой содержит прямовращающиеся высшие гармоники $\nu = (6c + 1)p$ и обратновращающиеся высшие гармоники $\nu = (6c - 1)p$, где $c = 1, 2, 3, \dots$

Амплитуды гармоник МДС на рисунке 3.11 в долях малых ступенек МДС (рис. 3.12):

$$F_{\nu m} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} F_x \cos \nu x dx = \frac{4}{\pi \nu} (\sin \nu 15^\circ + \sin \nu 45^\circ + 2 \sin \nu 75^\circ).$$

При перестановке фаз токов в двух любых фазных обмотках МДС основной гармоники запишется в виде

$$\frac{m\sqrt{2}I_1 w k_{об}}{\pi p} \sin(\omega t + px) = F_m \sin(\omega t + px),$$

что означает изменение направления вращения МДС, следовательно, и изменение направления вращения ротора.

Частота вращения ν -й гармоники:

$$n_{1\nu} = \frac{60f}{\nu}.$$

Скольжение ротора относительно прямовращающихся и относительно обратвращающихся гармоник ν :

$$s_{\text{впр}} = \frac{n_{1\nu} - n_2}{n_{1\nu}} = 1 - (1-s) \frac{\nu}{p};$$

$$s_{\text{воб}} = \frac{n_{1\nu} + n_2}{n_{1\nu}} = 1 + (1-s) \frac{\nu}{p}.$$

Признаки схем статорных обмоток на разные числа пар полюсов идентичны. У двигателей на число пар полюсов $p = 1, 2, 3, 4$ и, например с числом катушек в группе $q = 2$, числа пазов статоров $Z = 6pq = 12, 24, 36, 48$. Если $q = 3$, то $Z = 18, 36, 54, 72$. Как правило, числовой ряд пазов статоров $Z = 12, 18, 24, 36, 48, 54, 60, 72, 90$.

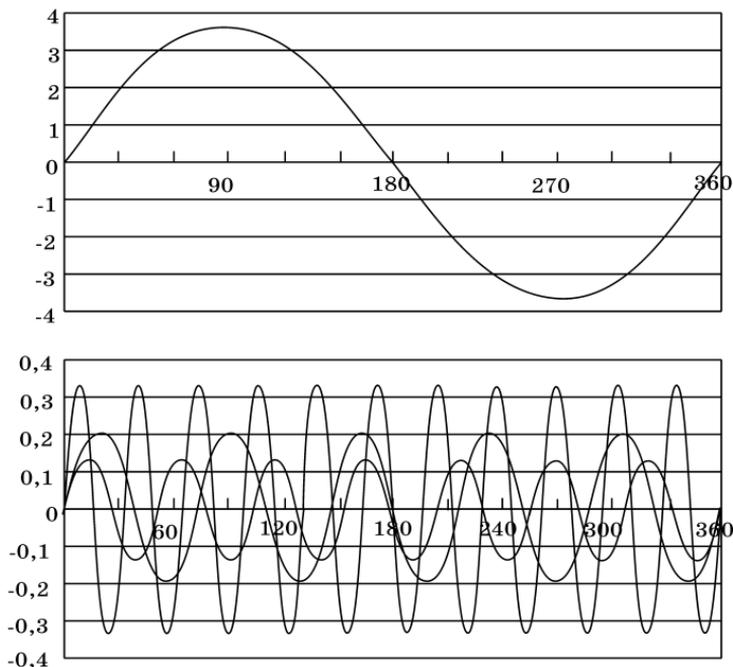


Рис. 3.12

Основная гармоника и первые высшие гармоники МДС

Двигатели малой и средней мощности выполняют, как правило, с однослойными обмотками. Однослойные обмотки проще для механизированной укладки в пазы статора при меньшем расходе изоляционных материалов. Двухполюсные однослойные обмотки выполнимы только вразвалку из двух полугрупп в каждой фазе. Этот же прием выполнения обмоток двигателей на другие числа полюсов способствует некоторому сокращению расхода обмоточного провода.

В двигателях бóльшей мощности чаще применяют двухслойные обмотки с укороченным шагом, что позволяет уменьшить длину витка, а при некотором шаге и значительно уменьшить амплитуды многих высших гармоник. В некоторых двигателях применяют и одно-двухслойные статорные обмотки.

Катушечные группы фазных обмоток могут соединяться и в уравновешенные по ЭДС параллельные ветви (*a*), что позволяет исключить дробное расчетное число витков в катушках, а также использовать при выполнении обмоток провод меньшего сечения.

Примеры схем обмоток показаны на рисунках 3.13–3.20.

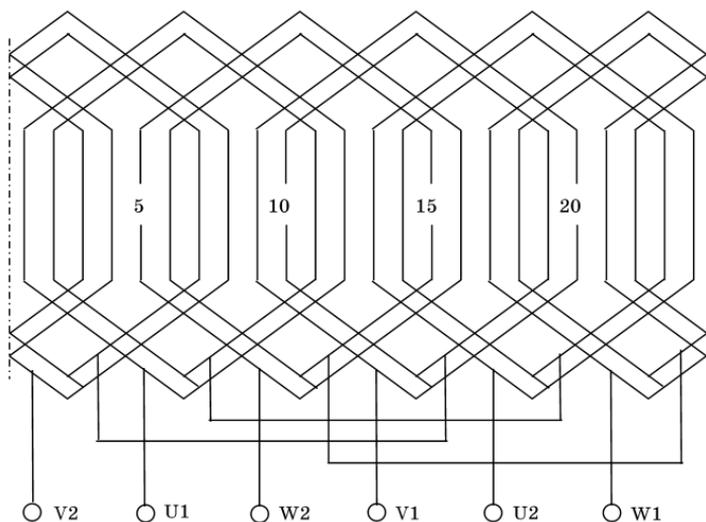


Рис. 3.13

Схема двухполюсной обмотки вразвалку

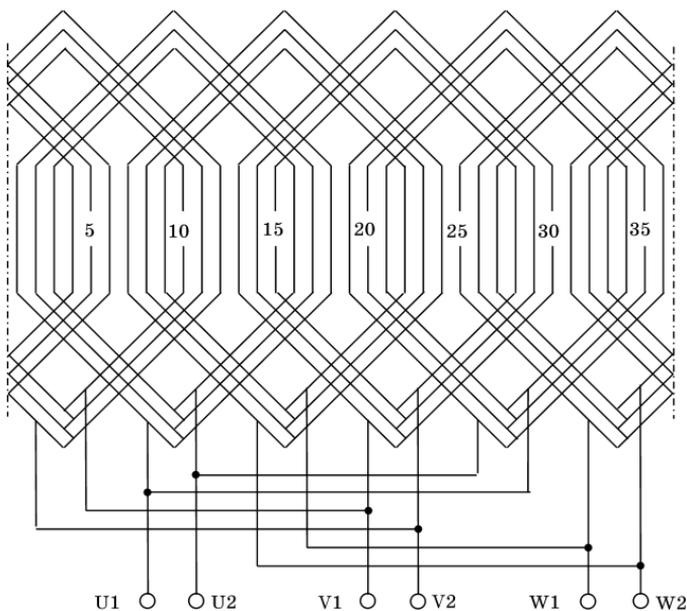


Рис. 3.14

Схема двухполюсной обмотки вразвалку, $a = 2$

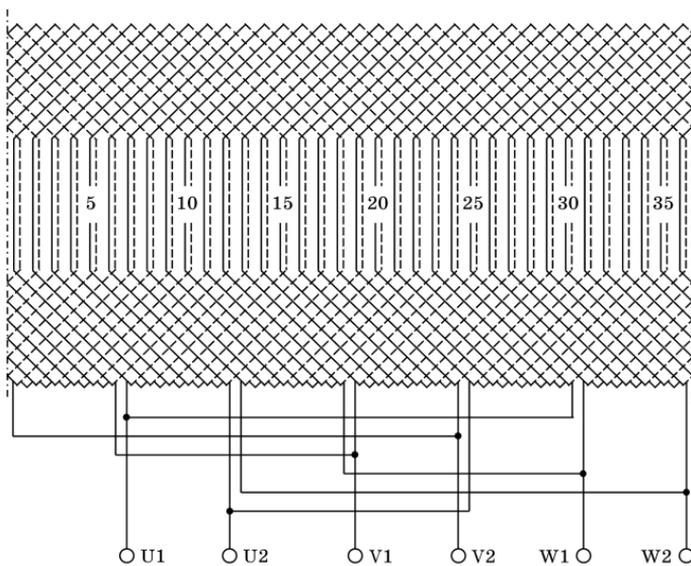


Рис. 3.15

Схема двухполюсной обмотки, $a = 2$

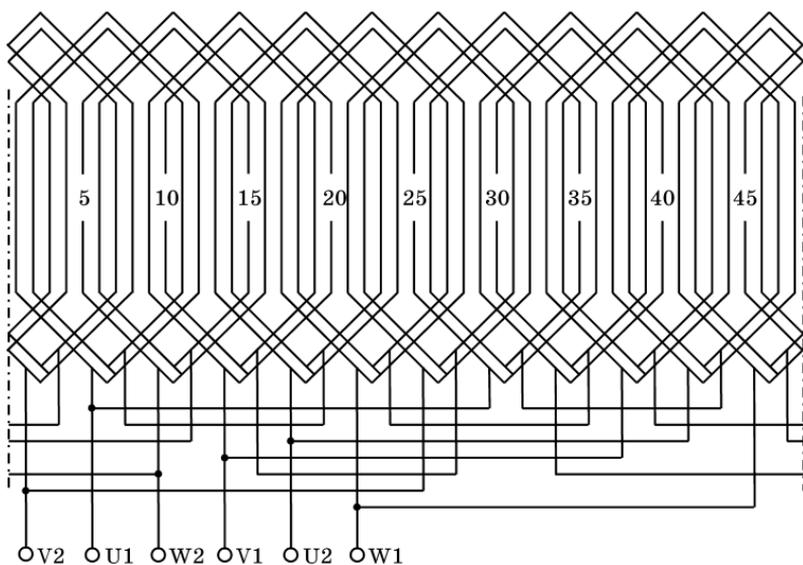


Рис. 3.16
 Схема четырехполюсной обмотки вразвалку, $a = 2$

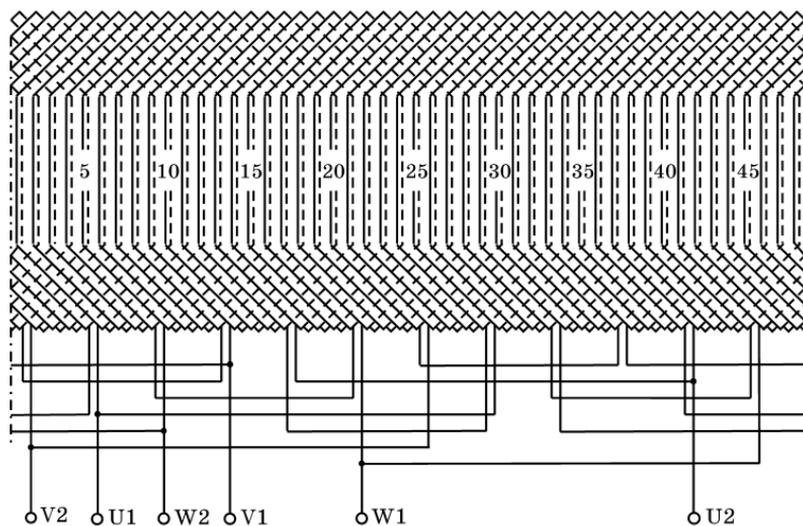


Рис. 3.17
 Схема четырехполюсной обмотки, $a = 2$

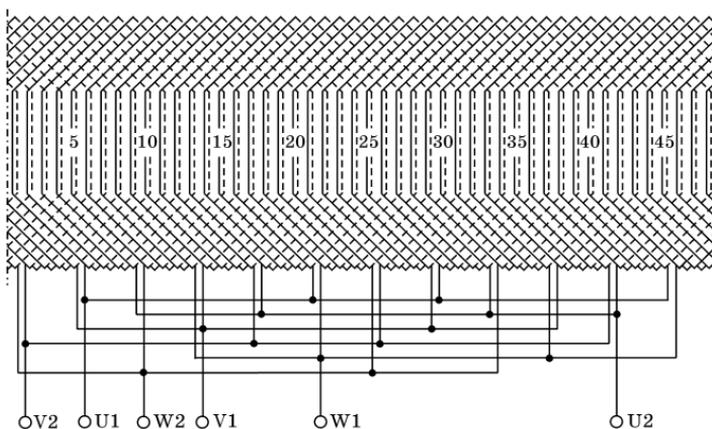


Рис. 3.18
 Схема четырехполюсной обмотки, $a = 4$

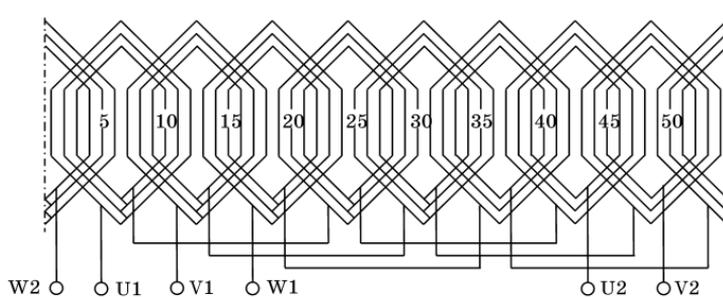


Рис. 3.19
 Схема шестиполюсной обмотки

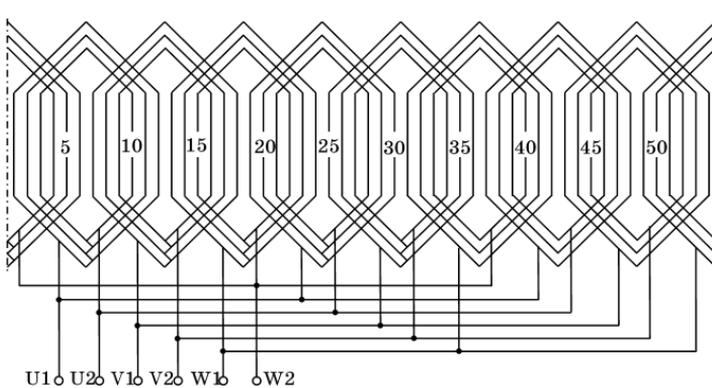


Рис. 3.20
 Схема шестиполюсной обмотки, $a = 3$

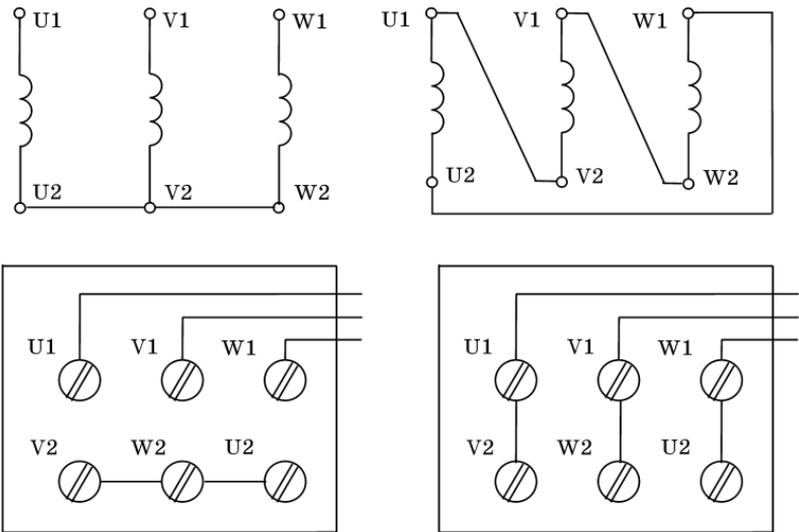


Рис. 3.21

Схемы соединений выводов в звезду (Y) и треугольник (Δ)

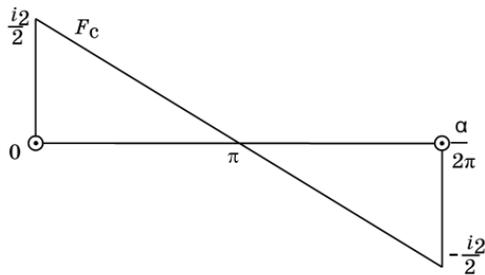
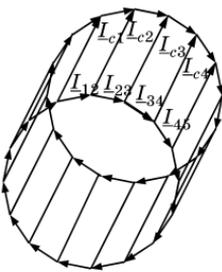


Рис. 3.22

Схема токов в стержнях и элементах замыкающих колец, МДС тока стержня

Статорные обмотки стандартных асинхронных двигателей рассчитывают, как правило, на номинальное фазное напряжение 220 В и соединяют в звезду (Y) при включении двигателя в сеть 380 В или в треугольник (Δ) при включении двигателя в сеть 220 В (рис. 3.21).

Фазную обмотку короткозамкнутого ротора составляют стержень и два элемента замыкающих стержни колец. Картина токов в стержнях $I_{c1} = I_{c2} = \dots = I_2$ и в элементах замыкающих колец $I_{12} = I_{23} = \dots = I_{кл}$ показана на рисунке 3.22.

МДС тока i_2 стержня:

$$F_A = \frac{i_2}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right).$$

Разложением в ряд Фурье МДС тока стержня ротора можно представить в виде множества роторных гармоник ρ :

$$F_c = \sum_{\rho=1}^{\infty} b_{c\rho} \sin \rho \alpha$$

с амплитудами

$$b_{c\rho} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{i}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \sin \rho \alpha d\alpha.$$

Принимая $i_2/2$ за условную единицу, амплитуды гармоник

$$\begin{aligned} b_{c\rho} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \sin \rho \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \rho \alpha d\alpha - \frac{2}{\pi^2} \int_0^{\pi} \alpha \sin \rho \alpha d\alpha = \\ &= -\frac{2}{\pi \rho} \cos \rho \alpha \Big|_0^{\pi} - \frac{2}{\pi^2} \frac{\sin \rho \alpha}{\rho^2} \Big|_0^{\pi} + \frac{2}{\pi^2} \frac{\alpha \cos \rho \alpha}{\rho} \Big|_0^{\pi} = \\ &= -\frac{2}{\pi \rho} (\cos \pi \rho - 1) + \frac{2}{\pi \rho} \cos \pi \rho = \frac{2}{\pi \rho}. \end{aligned}$$

Таким образом, МДС тока стержня (рис. 3.23)

$$F_c = \frac{2}{\pi} \sum_{\rho=1}^{\infty} \left(\frac{i_2}{2} \cdot \frac{1}{\rho} \sin \rho \alpha \right) = \frac{i_2}{\pi} \sum_{\rho=1}^{\infty} \frac{1}{\rho} \sin \rho \alpha.$$

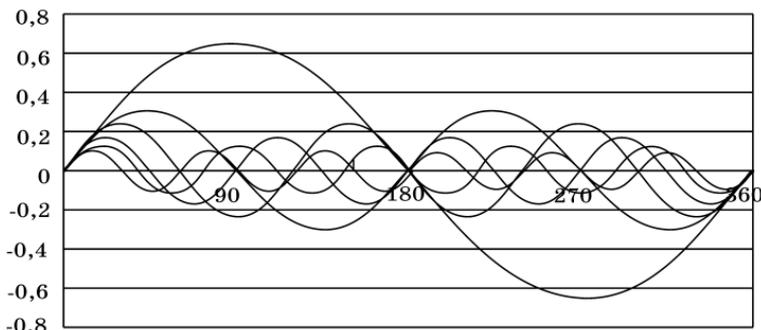


Рис. 3.23
Первые гармоники МДС тока стержня

Токи $\sqrt{2}I_2 \sin \omega t$, $\sqrt{2}I_2 \sin(\omega t - \varphi_2)$, ..., $\sqrt{2}I_2 \sin[\omega t - (Z_2 - 1)\varphi_2]$ основной гармоники с фазовым сдвигом $\varphi_2 = 2\pi p/Z_2$ при смещении стержней на $\alpha_2 = 2\pi/Z_2$ образуют МДС многофазной ($m_2 = Z_2$) роторной обмотки

$$F_2 = \frac{\sqrt{2}I_2}{\pi} \sum_{m_2=0}^{Z_2-1} \sin(\omega t - m_2\varphi_2) \sum_{\rho=1}^{\infty} \frac{1}{\rho} \sin \rho(\alpha - m_2\alpha_2) =$$

$$= \frac{\sqrt{2}I_2}{2\pi} \sum_{m_2=0}^{Z_2-1} \sum_{\rho=1}^{\infty} \frac{1}{\rho} \left[\cos\left(\omega t - \rho\alpha - 2\pi m_2 \frac{\rho - \rho}{Z_2}\right) - \right.$$

$$\left. - \cos\left(\omega t + \rho\alpha - 2\pi m_2 \frac{\rho + \rho}{Z_2}\right) \right].$$

Суммирование отлично от нуля только для гармоник $\rho = cZ_2 \pm p$ ($c = 0, 1, 2, \dots$). Для них

$$F_2 = \frac{m_2 \sqrt{2}I_2 \omega_2}{\pi} \sum_{c=0}^{\infty} \frac{1}{cZ_2 \pm p} \cos[\omega t - (cZ_2 \pm p)\alpha].$$

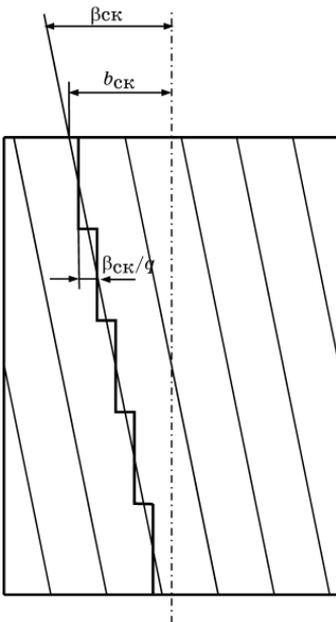


Рис. 3.24
К расчету $k_{об2}$

Таким образом, основной гармонике МДС статорной обмотки отвечают гармоники МДС роторной обмотки $\rho = cZ_2 \pm p$, среди которых $\rho = p$ — основная гармоника, остальные — зубцовые роторные гармоники. Другой гармонике v отвечают $\rho = v$ и $\rho = cZ_2 \pm v$. Высшие гармоники отрицательно действуют на пуск двигателей. Для снижения их амплитуд принимают число катушек в группе $q > 1$, двухслойные обмотки выполняют с укороченным шагом, а действие зубцовых гармоник $v = Z \pm p$, которые присутствуют в МДС всех обмоток и для которых $F_{vm}/F_m = p/(Z \pm p)$, исключают скосом пазов ротора (рис. 3.24).

Если стержень в скошенном на угол $\beta_{\text{СК}}$ пазу ротора условно разбить на большое число q частей, параллельных оси ротора, то коэффициент распределения q частей, он же коэффициент скоса пазов, он же и обмоточный коэффициент роторной обмотки для основной гармоники p и для гармоники ν :

$$k_{\text{об}2} = \frac{\sin p \frac{\beta_{\text{СК}}}{2}}{p \frac{\beta_{\text{СК}}}{2}}; \quad k_{\text{об}2\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\beta_{\text{СК}}}{2}}{\nu \frac{\beta_{\text{СК}}}{2}}.$$

Скос пазов ротора $b_{\text{СК}}$ принимают таким, чтобы для зубцовых гармоник $k_{\text{об}2(\nu=Z\pm p)} \approx 0$.

МДС основной гармоники роторной обмотки с учетом обмоточного коэффициента

$$F_2 = \frac{m_2 \sqrt{2} I_2 w_2 k_{\text{об}2}}{\pi p} \cos(\omega t - p\alpha).$$

Результирующую амплитуду основных гармоник МДС обмоток статора и ротора определяет намагничивающий ток I_μ , близкий по величине к току холостого хода двигателя I_0 ,

$$\frac{m\sqrt{2}I_1 w k_{\text{об}}}{\pi p} + \frac{m_2\sqrt{2}I_2 w_2 k_{\text{об}2}}{\pi p} = \frac{m\sqrt{2}I_0 w k_{\text{об}}}{\pi p} \approx \frac{m\sqrt{2}I_\mu w k_{\text{об}}}{\pi p} = F_{m\mu}.$$

У двигателя с зубчатыми поверхностями статора и ротора воздушный зазор δ как бы увеличивается в k_δ раз, где k_δ — коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера). Значение k_δ определяется по формуле (обозначения по рисунку 3.25)

$$k_\delta = \frac{t}{t - \gamma\delta},$$

где

$$\gamma = \frac{(b_{\text{H}}/\delta)^2}{5 + b_{\text{H}}/\delta}.$$

Коэффициенты воздушно-го зазора рассчитывают отдельно для зубцов статора $k_{\delta 1}$

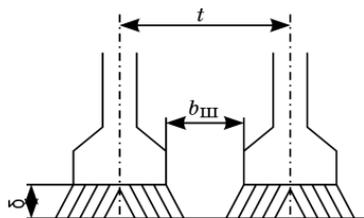


Рис. 3.25
К расчету коэффициента
воздушного зазора

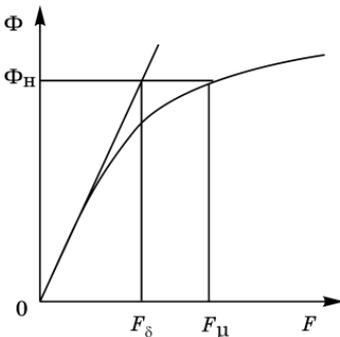


Рис. 3.26
К определению
коэффициента насыщения
магнитной цепи

и ротора $k_{\delta 2}$, при этом в первом случае предполагается, что поверхность статора зубчатая, а ротора — гладкая, а во втором, наоборот. При определении $k_{\delta 2}$ в формулу подставляют соответственно t_2 , b_{m2} ротора. Результирующий коэффициент воздушного зазора двигателя $k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$. Для стандартных двигателей $k_{\delta} \approx 1,2-1,4$.

Если сталь магнитопровода насыщена, то индукция в воздушном зазоре B_{δ} уменьшается в k_{μ} раз, где k_{μ} — коэффициент насыщения магнитной цепи, равный отношению всей магнитной цепи МДС к МДС воздушного зазора F_{μ}/F_{δ} (рис. 3.26). Для стандартных двигателей в зависимости от числа полюсов $k_{\mu} \approx 1,7-1,3$.

Из связи индукции в воздушном зазоре B_{δ} с напряженностью магнитного поля (H_{δ}) и амплитудой основной гармоники МДС

$$B_{\delta} = \mu_0 H_{\delta} = \mu_0 \frac{F_{\delta}}{\delta k_{\delta}} = \mu_0 \frac{F_{m\mu}}{\delta k_{\delta} k_{\mu}} = \frac{\mu_0 m \sqrt{2} I_{\mu} w k_{об}}{\pi r \delta k_{\delta} k_{\mu}}$$

находим выражение для намагничивающего тока

$$I_{\mu} = \frac{B_{\delta} \pi r \delta k_{\delta} k_{\mu}}{m \sqrt{2} w k_{об 1} \mu_0},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Магнитный поток, равный произведению средней индукции в воздушном зазоре на полюсном делении статора $\tau = \pi D/2p$, на площадь полюсного деления $\pi D l/2p = \tau l$ (D и l — внутренний диаметр и длина статора):

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta} \tau l,$$

перемещаясь с линейной скоростью

$$\frac{\pi D n_1}{60} = \frac{\pi D 60 f}{60 p} = \frac{\pi D f}{p} = 2 \tau f,$$

относительно $2wk_{об}$ эффективных проводников статорной обмотки и относительно $2w_2k_{об2}$ эффективных проводников обмотки неподвижного ротора наводит в обмотках ЭДС:

$$E = \frac{B_\delta}{\sqrt{2}} l 2 \tau f 2 w k_{об} = \frac{\Phi \pi}{\sqrt{2}} f 2 w k_{об} = \pi \sqrt{2} f w k_{об} \Phi = 4,44 f w k_{об} \Phi;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 k_{об2} \Phi.$$

По ЭДС E рассчитывают число витков на фазу статорной обмотки на номинальное фазное напряжение U_H :

$$w = \frac{E}{4,44 f k_{об} \Phi} = \frac{k_E U_H}{4,44 f k_{об} \Phi},$$

где $k_E \approx 1 - 75 p^2 \delta / ZD$ — эмпирический коэффициент, учитывающий падение напряжения на обмотке при номинальном токе.

Например, для $U_H = 220$ В и частоты тока $f = 50$ Гц

$$w \approx \frac{k_E}{k_{об} \Phi}.$$

При расчете статорных обмоток индукцию в воздушном зазоре B_δ и поток $\Phi = B_\delta D l / p$ принимают такими, чтобы индукция в спинке статора $B_a = \Phi / 2Q_a$ ($Q_a = 0,95 h_a l$ — площадь спинки статора, рис. 3.27) не превышала принятой из опыта электромашиностроения величины, как правило — 1,6 Тл. На рисунке D_a , h_a , h — наружный диаметр статора, высота спинки, полная высота паза.

При расчете диаметра обмоточного провода за площадь изолированного паза Q для проводников условного квадратного сечения принимают 68–72% площади паза в свету.

Расчет статорных обмоток оправдан, например, при пересчете на другое число полюсов.

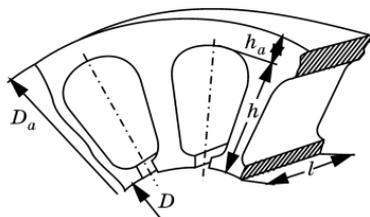


Рис. 3.27
Вид сердечника статора

Расчет обмотки на габарите АИР160S4 (рис. 3.28):
 $D = 163$ мм; $l = 150$ мм; $\delta = 0,5$ мм; $Q = 100$ мм² — площадь изолированного паза для проводников условного квадратного сечения.

Значение коэффициента ЭДС

$$k_E = 1 - 75p^2\delta/ZD = 1 - 75 \cdot 3^2 \cdot 0,5 / (48 \cdot 163) = 0,955.$$

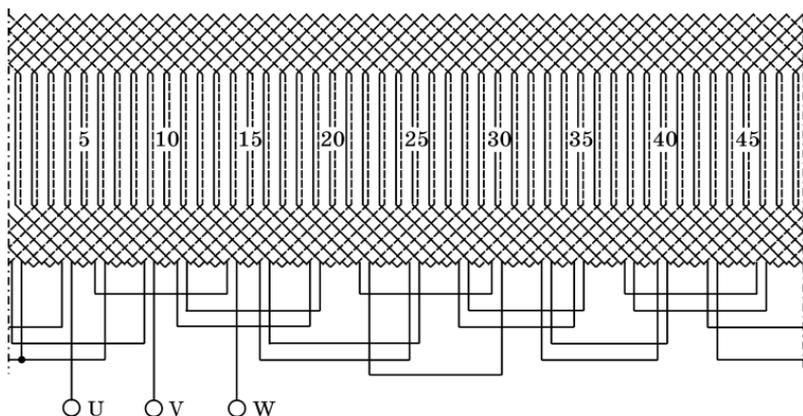


Рис. 3.28

Схема шестиполюсной обмотки, $k_{об} = 0,94$

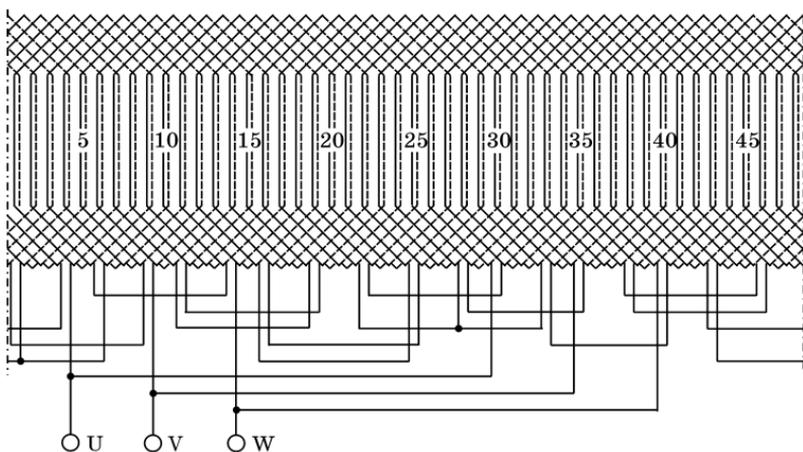


Рис. 3.29

Схема шестиполюсной обмотки, $a = 2$

Поток и число витков на фазу для $U_n = 220$ В:

$$\Phi = B_s D l / p = 0,83 \cdot 163 \cdot 150 \cdot 10^{-6} / 3 = 6,77 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$w = k_E / (k_{об} \Phi) = 0,955 / (0,94 \cdot 6,77 \cdot 10^{-3}) = 150.$$

В катушке $150/16 = 9,5$ витков. Для исключения дробности выполняем обмотку из двух параллельных ветвей (рис. 3.29).

В таком варианте схемы в катушке будет 19 витков.

В пазу $N = 38$ проводников диаметром

$$d_{из} = \sqrt{Q/N} = \sqrt{100/38} = 1,62 \text{ мм.}$$

Выбираем обмоточный провод стандартного диаметра $d/d_{из} = 1,50/1,61$ мм.

3.4. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При вращении ротора частота ЭДС в его обмотке f_2 , значение ЭДС E_{2s} и индуктивного сопротивления x_{2s} согласуются с этими же величинами неподвижного ротора f_1 , E_2 , x_2 через скольжение s : $f_2 = f_1 s$, $E_{2s} = E_2 s$, $x_{2s} = x_2 s$.

Ток ротора I_{2s} частоты f_2 также можно представить током ротора I_2 частоты f_1 , поскольку

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2 \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + x_2^2 \cdot s^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + x_2^2}} = I_2.$$

Из последнего выражения следует, что при замене тока I_{2s} на ток I_2 активное сопротивление ротора возрастает на величину

$$\frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \frac{1-s}{s}.$$

Таким образом, асинхронный двигатель при работе с любым скольжением s может быть представлен двигателем с неподвижным ротором или трансформатором с вращающимся магнитным полем, а также соответствующей схемой замещения (см. рис. 3.30).

При работе двигателя потерями в стали ротора можно пренебречь вследствие малой частоты перемагничивания, поэтому потери в стали P_c представляют собой потери

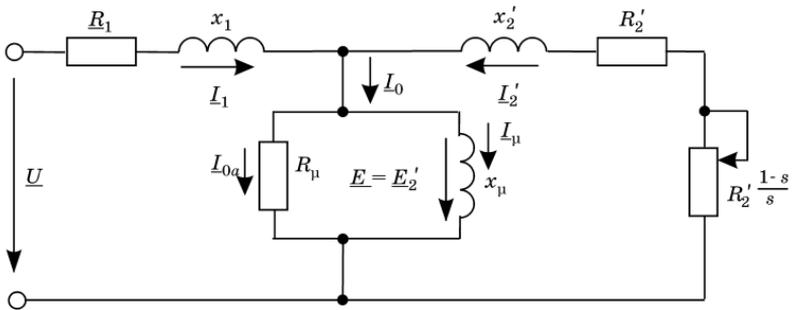


Рис. 3.30
Т-образная схема замещения двигателя

в стали статора. Для отображения потерь в стали и механических потерь P_M (на трение в подшипниках и на вентиляцию) в схему замещения введено условное активное сопротивление R_μ ($I_{0a}^2 R_\mu = P_c + P_M$). На схеме замещения сопротивление взаимоиנדукции

$$x_\mu = \omega M = \frac{E}{I_\mu} = \frac{\frac{B_\delta}{\sqrt{2}} l \frac{\pi D}{p} f 2w k_{об}}{B_\delta \pi p \delta k_\delta k_\mu} = 2f \frac{m \mu_0 D l w^2 k_{об}^2}{p^2 \delta k_\delta k_\mu},$$

$$\frac{m \sqrt{2} w k_{об} \mu_0}{m \sqrt{2} w k_{об} \mu_0}$$

где

$$M = \frac{m \mu_0 D l w^2 k_{об}^2}{\pi p^2 \delta k_\delta k_\mu}$$

— коэффициент взаимоиנדукции.

Приведенные значения сопротивлений роторной обмотки можно найти, исходя из условия одинакового значения электрических потерь в действительной и приведенной обмотке, а также с учетом сохранения тех же соотношений между активными и индуктивными сопротивлениями.

Из равенства электрических потерь $m_2 (I_2)^2 R_2 = m (I_2')^2 R_2'$ приведенное активное сопротивление роторной обмотки

$$R_2' = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{m (I_2')^2} = \frac{m_2 R_2 k_i^2}{m} = \frac{m w^2 k_{об}^2}{m_2 w_2^2 k_{об2}^2} R_2 = k R_2,$$

где $k = m w^2 k_{об}^2 / m_2 w_2^2 k_{об2}^2$ — коэффициент приведения сопротивления.

Согласно соотношению, связывающему параметры реальной и приведенной роторной обмотки,

$$\frac{R_2}{x_2} = \frac{R'_2}{x'_2} = \frac{R_2 k}{x'_2},$$

приведенное индуктивное сопротивление роторной обмотки

$$x'_2 = x_2 k.$$

Векторным уравнениям схемы замещения:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= -\underline{E} + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 x_1 = -\underline{E} + \underline{I}_1 \underline{Z}_1; \\ 0 &= \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \frac{R'_2}{s} - j x'_2 \underline{I}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \left(\underline{Z}'_2 + R'_2 \frac{1-s}{s} \right); \\ \underline{I}_0 &= \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{aligned}$$

соответствует векторная диаграмма двигателя в режиме нагрузки, построенная относительно исходного вектора потока Φ (рис. 3.31).

Из определения действующего значения ЭДС

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \Psi_m}{\sqrt{2}}$$

амплитуда потокосцепления статорной обмотки

$$\Psi_m = w k_{о6} \Phi.$$

ЭДС статорной обмотки

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d}{dt} (\Psi_m \sin \omega t) = \\ &= -\omega w k_{о6} \Phi \cos \omega t = \\ &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

отстает от вектора потока на четверть периода напряжения.

При анализе работы двигателя Г-образной схеме замещения предпочитают Г-образную

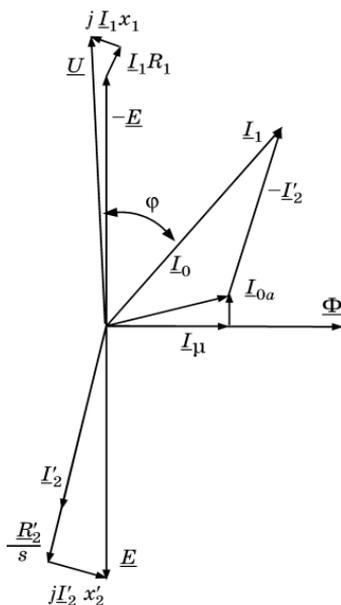


Рис. 3.31
Векторная диаграмма асинхронного двигателя при нагрузке

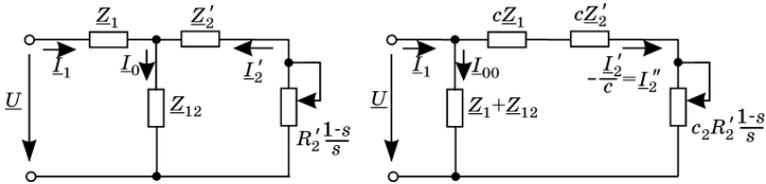


Рис. 3.32

Т- и Г-образная схемы замещения асинхронного двигателя с параметрами в комплексной форме

схему замещения (рис. 3.32), которая облегчает расчет токов \underline{I}_1 и \underline{I}'_2 при любом скольжении, так как легко определяется не зависящий от скольжения ток идеально-го холостого хода двигателя

$$\underline{I}_{00} = \frac{U}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{12}}.$$

Согласно Т-образной схеме замещения

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_{2s} \cdot \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{2s} + \underline{Z}_{12}}},$$

где $\underline{Z}_{2s} = R'_2/s + jx'_2$.

Ток главной цепи Г-образной схемы замещения

$$\underline{I}''_2 = \underline{I}_1 - \underline{I}_{00} = \frac{U}{\underline{C}\underline{Z}_1 + \underline{C}^2\underline{Z}_{2s}},$$

где $\underline{C} = 1 + \underline{Z}_1/\underline{Z}_{12}$ — поправочный коэффициент, с помощью которого осуществляется изменение параметров и токов главной и намагничивающей цепи по величине и фазе.

Из сравнения тока \underline{I}''_2 с вторичным током Т-образной схемы замещения

$$\underline{I}'_2 = \frac{U - \underline{I}_1 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_{2s}} + \frac{U}{\underline{Z}_1 + \underline{C}\underline{Z}_{2s}}$$

находим

$$\frac{-\underline{I}'_2}{\underline{C}} = \underline{I}''_2.$$

При представлении поправочного коэффициента

$$\underline{C} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{12}} = ce^{-j\gamma},$$

где

$$\gamma = \arctg \frac{R_1 x_{12} - R_{12} x_1}{R_{12}(R_1 + R_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})},$$

ток главной цепи Г-образной схемы замещения

$$\begin{aligned} \underline{I}_2'' &= \frac{\underline{U}}{\underline{C} \underline{Z}_1 + \underline{C}^2 \underline{Z}_{2s}} = \\ &= \frac{\underline{U}}{\underline{C}^2 \left(\underline{Z}_{2s} + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{12}} \right)} = \frac{\underline{U} e^{-j2\gamma}}{c^2 \left(\underline{Z}_{2s} + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{12}} \right)}. \end{aligned}$$

Пренебрегая в отдельных случаях малой величиной R_{12} по сравнению с x_{12} , за поправочный коэффициент

$$\begin{aligned} \underline{C} &= 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{12}} = 1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_{12}} = \\ &= 1 + \frac{x_1 - jR_1}{x_{12}} = \left(1 + \frac{x_1}{x_{12}} \right) - j \frac{R_1}{x_{12}} \end{aligned}$$

в виду малости R_1/x_{12} принимают его вещественную часть

$$c = 1 + \frac{x_1}{x_{12}}$$

что и отображается на Г-образной схеме замещения.

3.5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДВИГАТЕЛЯ

Согласно Г-образной схеме замещения асинхронной машины электромагнитной мощности ротора ($x_k = x_1 + cx_2'$)

$$P_{эм} = m(I_2'')^2 \frac{R_2'}{s} = \frac{mU^2 \frac{R_2'}{s}}{\left(R_1 + c \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + cx_2')^2} = \frac{mU^2 \frac{R_2'}{s}}{\left(R_1 + c \frac{R_2'}{s} \right)^2 + x_k^2}$$

соответствует момент (для двигателя на p пар полюсов $\omega_1 = \omega/p$)

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{mU^2 R'_2 s}{\omega_1 [(sR_1 + cR'_2)^2 + s^2 x_K^2]}.$$

Исследуя функцию

$$\begin{aligned} \frac{dM}{ds} &= \frac{mU^2 R'_2}{\omega_1} \times \\ &\times \frac{s^2 R_1^2 + 2sR_1 cR'_2 + c^2 R_2'^2 + s^2 x_K^2 - 2s^2 R_1^2 - s2R_1 cR'_2 - 2s^2 x_K^2}{\left[\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_K^2 \right]^2} = \\ &= \frac{mU^2 R'_2}{\omega_1} \cdot \frac{-s^2 R_1^2 + c^2 R_2'^2 - s^2 x_K^2}{[(sR_1 + cR'_2)^2 + s^2 x_K^2]^2} = 0, \end{aligned}$$

находим критическое скольжение

$$s_K = \pm \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}},$$

а по нему критический или максимальный момент

$$M_m = \pm \frac{mU^2 \sqrt{R_1^2 + x_K^2}}{c\omega_1 \left[\left(R_1 + \left(\pm \sqrt{R_1^2 + x_K^2} \right) \right)^2 + x_K^2 \right]} = \pm \frac{mU^2}{2c\omega_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2} \right]},$$

где «+» относится к двигательному режиму, а «-» к генераторному режиму работы асинхронной машины (при $s < 0$) (рис. 3.33).

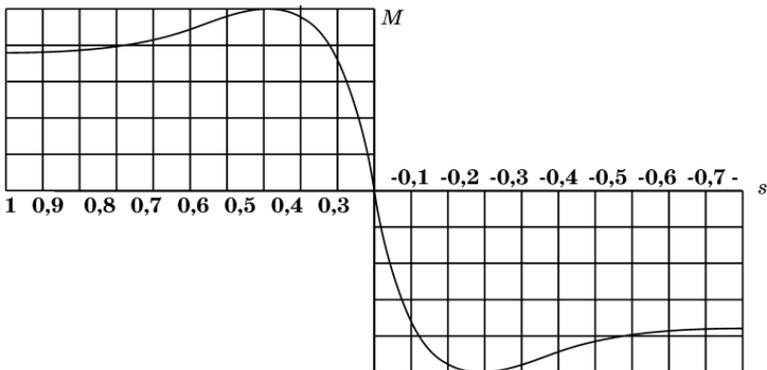


Рис. 3.33
Зависимость $M = f(s)$ асинхронной машины

Отношение моментов

$$\begin{aligned}
 \frac{M}{M_m} &= \frac{2 \frac{cR'_2}{s} \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2} \right)}{\left(R_1 + \frac{cR'_2}{s} \right)^2 + x_K^2} = \frac{2 \frac{cR'_2}{s} \left(R_1 + \frac{cR'_2}{s_K} \right)}{R_1^2 + 2R_1 \frac{cR'_2}{s} + \frac{c^2 R_2'^2}{s^2} + x_K^2} = \\
 &= \frac{2 \left(R_1 \frac{cR'_2}{s} + \frac{c^2 R_2'^2}{s s_K} \right)}{\frac{c^2 R_2'^2}{s_K^2} + 2R_1 \frac{cR'_2}{s} + \frac{c^2 R_2'^2}{s^2}} = \frac{2 \left(\frac{R_1}{s c R_2'} + \frac{1}{s s_K} \right)}{\frac{1}{s_K^2} + 2 \frac{R_1}{s c R_2'} + \frac{1}{s^2}} = \frac{2 \left(\frac{\alpha}{s} + \frac{1}{s s_K} \right)}{\frac{1}{s_K^2} + \frac{2\alpha}{s} + \frac{1}{s^2}} = \\
 &= \frac{2 \frac{s_K \alpha + 1}{s s_K}}{\frac{s^2 + 2s_K^2 s \alpha + s_K^2}{s^2 s_K^2}} = \frac{2 + 2s_K \alpha}{s^2 + 2s_K^2 s \alpha + s_K^2} = \frac{2 + 2s_K \alpha}{\frac{s}{s_K} + 2s_K \alpha + \frac{s_K}{s}}
 \end{aligned}$$

определяет зависимость $M = f(s)$ в виде формулы Клосса ($\alpha = R_1 / cR'_2$):

$$M = \frac{M_m (2 + 2\alpha s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2\alpha s_K}.$$

Без учета малой величины $2\alpha s_K$ упрощенная формула Клосса

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}.$$

Согласно упрощенной формуле Клосса, кратность пускового момента двигателя можно представить в таком виде (s_H — номинальное скольжение):

$$\begin{aligned}
 k_{\Pi} &= \frac{M_{\Pi}}{M_H} = \frac{\frac{2M_m}{\frac{s_K}{s_H} + \frac{s_K}{s_H}}}{\frac{2M_m}{\frac{1}{s_K} + \frac{s_K}{s_K}}} = \frac{\frac{s_H + s_K}{s_K s_H}}{\frac{1}{s_K} + \frac{s_K}{s_K}} = \frac{\frac{s_H^2 + s_K^2}{s_K s_H}}{\frac{1 + s_K^2}{s_K}} = \frac{s_H^2 + s_K^2}{s_H (1 + s_K^2)}.
 \end{aligned}$$

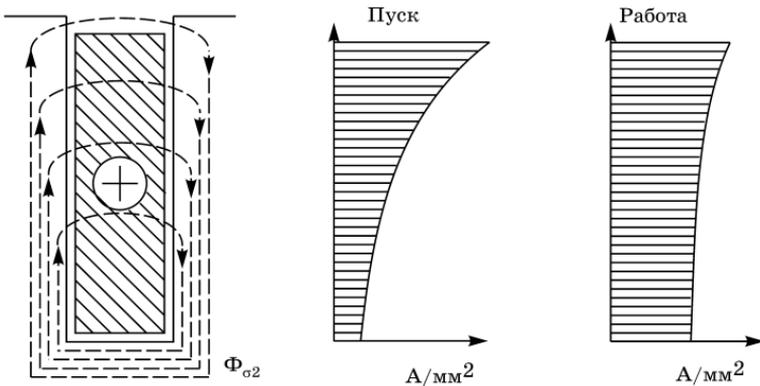


Рис. 3.34

Вид распределения плотности тока в стержне роторной обмотки

Увеличению пускового момента двигателя способствует определенная форма паза ротора, следовательно, форма стержня роторной обмотки. При глубоких пазах ротора с нижней частью стержня сцеплено больше линий потока пазового рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$, создаваемого пусковым током ротора (рис. 3.34), и наводится большая ЭДС, вытесняющая ток к верхней части стержня. Условное уменьшение сечения части стержня с большей плотностью тока (A/mm^2) эквивалентно увеличению активного сопротивления этой

части стержня и стержня в целом. Индуктивное сопротивление стержня при пуске уменьшается из-за насыщения зубцов ротора потоком пазового рассеяния.

При пуске двигателя уменьшается и индуктивное сопротивление статорной обмотки также из-за насыщения зубцов статора потоком пазового рассеяния от пускового тока статора.

Зависимость частоты вращения n_2 от момента на валу $n_2 = f(M_2)$ называется механической характеристикой

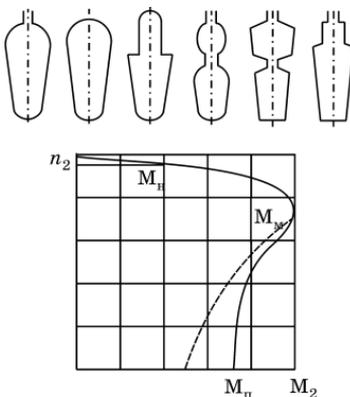


Рис. 3.35

Форма пазов ротора и вид механической характеристики двигателя

асинхронного двигателя (рис. 3.35). На рисунке штриховая линия соответствует механической характеристике без учета изменения параметров двигателя при пуске.

3.6. ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Наряду с потоком основной гармоники ток статорной обмотки создает поток пазового рассеяния, поток рассеяния лобовых частей (рис. 3.36) и потоки дифференциального рассеяния — потоки гармоник ν . В свою очередь, ток ротора создает поток пазового рассеяния, поток рассеяния элементов замыкающих колец, поток рассеяния скоса пазов, потоки дифференциального рассеяния. Потоки рассеяния определяют значения составляющих индуктивных сопротивлений статорной и роторной обмотки.

Для расчета составляющей индуктивного сопротивления статорной обмотки от потока пазового рассеяния x_{Π} выделим в пазу на высоте h_y от дна паза элемент высотой d_y , представляющий собой трубку потока пазового рассеяния. Поток элемента на единицу длины паза от тока i в N_y проводниках и потокосцепление:

$$d\Phi_y = d\Phi_y N_y = \mu_0 i N_y \frac{d_y}{b_y};$$

$$d\psi_y = d\Phi_y N_y = \mu_0 i N_y \frac{d_y}{b_y} N_y = \mu_0 i N_y^2 \frac{d_y}{b_y},$$

где d_y/b_y — коэффициент магнитной проводимости потока пазового рассеяния на единицу длины паза (b_y — ширина паза на высоте h_y).

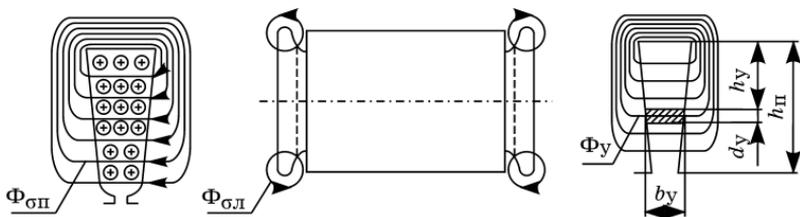


Рис. 3.36

Вид потоков рассеяния пазового и лобовых частей обмотки

Потокосцепление всего потока рассеяния паза на единицу длины паза с N_y проводниками

$$\Psi_{\pi} = \mu_0 i \int_0^{h_{\pi}} N_y^2 \frac{d_y}{b_y}$$

или

$$\Psi_{\pi} = \mu_0 i N_{\pi}^2 \int_0^{h_{\pi}} \left(\frac{N_y}{N_{\pi}} \right)^2 \frac{d_y}{b_y},$$

где N_{π} — полное число проводников в пазу.

Индуктивное сопротивление проводников паза на длину l

$$x_{\sigma\pi} = \omega L_{\sigma\pi} = \omega \mu_0 N_{\pi}^2 l \int_0^{h_{\pi}} \left(\frac{N_y}{N_{\pi}} \right)^2 \frac{d_y}{b_y}.$$

Интеграл определяет эквивалентный коэффициент проводимости потока пазового рассеяния — коэффициент проводимости с учетом потокосцепления со всеми проводниками паза

$$\lambda_{\pi} = \int_0^{h_{\pi}} \left(\frac{N_y}{N_{\pi}} \right)^2 \frac{d_y}{b_y}.$$

Индуктивное сопротивление проводников паза

$$x_{\sigma\pi} = \omega L_{\sigma\pi} = \omega \mu_0 N_{\pi}^2 l \lambda_{\pi} = 2\pi f \mu_0 N_{\pi}^2 l \lambda_{\pi}.$$

Фазная обмотка состоит из катушечных групп, стороны катушек каждой из которых занимают q пазов. Картины потоков рассеяния, на которой вокруг каждого паза создается свое поле рассеяния, можно заменить картиной, на которой все пазы охватываются одним общим потоком рассеяния. МДС q пазов возрастает в q раз по сравнению с МДС одного паза, при этом во столько раз возрастает и магнитное сопротивление, следовательно, поток рассеяния останется прежним, а потокосцепление возрастет в q раз.

В однослойной обмотке на p пар полюсов с последовательным соединением катушечных групп потокосцепление фазной обмотки увеличивается в p раз, при этом об-

щее число витков фазной обмотки составляет $w = N_{\text{п}} q p$, откуда $N_{\text{п}} = w / (q p)$.

За условную длину поля рассеяния витка, стороны которого расположены в двух пазах, принимают две длины статора $2l$. Индуктивное сопротивление от потока пазового рассеяния всех w витков обмотки

$$\begin{aligned} x_{\text{п1}} &= p q x_{\text{сп}} = p q \omega \mu_0 N_{\text{п}}^2 2l \lambda_{\text{п}} = \\ &= 2 p q \omega \mu_0 \frac{w^2}{p^2 q^2} l \lambda_{\text{п}} = 4 \pi f \mu_0 \frac{w^2}{p q} l \lambda_{\text{п}}. \end{aligned}$$

Расчетные формулы для определения коэффициента проводимости потока пазового рассеяния $\lambda_{\text{п}}$ получают с учетом размеров и конфигурации паза статора, а также схемного вида статорной обмотки. Так, для прямоугольного паза с шириной $b_y = b_{\text{п}}$ и высотой $h_{\text{п}}$, полностью занятого проводниками однослойной обмотки и для которого

$$N_y / N = h_y / h_{\text{п}};$$

$$\lambda_{\text{п}} = \int_0^{h_{\text{п}}} \left(\frac{N_y}{N} \right)^2 \frac{d_y}{b_y} = \int_0^{h_{\text{п}}} \left(\frac{h_y}{h_{\text{п}}} \right)^2 \frac{d_y}{b_{\text{п}}} = \frac{1}{h_{\text{п}}^2 b_{\text{п}}} \int_0^{h_{\text{п}}} h_y^2 d_y = \frac{h_{\text{п}}}{3 b_{\text{п}}}.$$

В случаях, когда проводники с током занимают не весь паз и конфигурация паза отличается от прямоугольной, для расчета $\lambda_{\text{п}}$ интегрирование проводят по частям паза, когда ширина каждой части может быть выражена аналитически в зависимости от высоты паза.

У двухслойной обмотки при степени укорочения шага β в части пазов расположены стороны катушек, принадлежащих разным фазным обмоткам. Токи сторон катушек в части пазов сдвинуты по фазе, следовательно, результирующая МДС и эквивалентная проводимость рассеяния уменьшаются. Например, для прямоугольного паза при его полном заполнении

$$\lambda_{\text{п}} \approx \frac{h_{\text{п}}}{3 b_{\text{п}}} \cdot \frac{3\beta + 1}{4}.$$

Чтобы не производить интегрирование при каждом из расчетов эквивалентной проводимости рассеяния $\lambda_{\text{п}}$ для

наиболее применяемых конфигураций пазов, оно выполнено и приводится в виде справочных формул в литературе по проектированию электрических машин.

Индуктивное сопротивление лобовых частей обмотки зависит от числа проводников, идущих в тесном соприкосновении. В простых концентрических обмотках проводники, исходящие из q пазов, составляет общий пучок, охватываемый общим потоком рассеяния. Индуктивное сопротивление лобовых частей фазной обмотки длиной $2l_{\text{л}}$ возрастает в q^2 раз и составляет подобно выражению для $x_{\text{п1}}$:

$$\begin{aligned} x_{\text{л1}} &= pqx_{\text{сл}} = pq^2\omega\mu_0 N^2 2l_{\text{л}}\lambda_{\text{л}} = \\ &= pq^2\omega\mu_0 \frac{w^2}{p^2q^2} 2l_{\text{л}}\lambda_{\text{л}} = 4\pi f\mu_0 \frac{w^2}{p} l_{\text{л}}\lambda_{\text{л}}, \end{aligned}$$

где $\lambda_{\text{л}}$ — коэффициент проводимости потока рассеяния лобовых частей.

Таким образом, формула для индуктивного сопротивления пазовых и лобовых частей статорной обмотки получает вид:

$$x_{(\text{п1+л1})} = 4\pi f\mu_0 \frac{w^2}{p} \left(\frac{l}{q}\lambda_{\text{п}} + l_{\text{л}}\lambda_{\text{л}} \right).$$

Рассеяние лобовых частей поддается математическому расчету труднее. Наиболее употребительные эмпирические формулы:

- для однослойной простой концентрической обмотки:

$$l_{\text{л}}\lambda_{\text{л}} \approx 0,67l_{\text{л}} - 0,43 \frac{\pi D}{2p};$$

- для однослойной концентрической обмотки вразвалку:

$$l_{\text{л}}\lambda_{\text{л}} \approx 0,47l_{\text{л}} - 0,3 \frac{\pi D}{2p};$$

- для двухслойной обмотки:

$$l_{\text{л}}\lambda_{\text{л}} \approx 0,57 \frac{3\beta - 1}{2} \cdot \frac{\pi D}{2p}.$$

Индуктивное сопротивление указанных типов обмоток:

$$x_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{p} \left[\frac{l}{q} \lambda_{\pi} + \left(0,67 l_{\pi} - 0,43 \frac{\pi D}{2p} \right) \right] + \tau_{\text{д}} x_{\mu};$$

$$x_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{p} \left[\frac{l}{q} \lambda_{\pi} + \left(0,47 l_{\pi} - 0,3 \frac{\pi D}{2p} \right) \right] + \tau_{\text{д}} x_{\mu};$$

$$x_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{p} \left(\frac{l}{q} \cdot \lambda_{\pi} \frac{3\beta + 1}{4} + 0,57 \frac{3\beta - 1}{2} \cdot \frac{\pi D}{2p} \right) + \tau_{\text{д}} x_{\mu},$$

где $\tau_{\text{д}} x_{\mu}$ — составляющая от потоков дифференциального рассеяния ($\tau_{\text{д}}$ — коэффициент дифференциального рассеяния).

Из соотношения

$$\frac{x_{\mu\nu}}{x_{\mu}} = \frac{2f \frac{m\mu_0 D l w^2 k_{\text{обв}}^2}{v^2 \delta k_{\delta} k_{\mu}}}{2f \frac{m\mu_0 D l w^2 k_{\text{об}}^2}{p^2 \delta k_{\delta} k_{\mu}}} = \frac{k_{\text{обв}}^2 p^2}{k_{\text{об}}^2 v^2} = \left(\frac{F_{\text{vm}}}{F_m} \right)^2$$

выражение для коэффициента дифференциального рассеяния

$$\tau_{\text{д}} = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} F_{\text{vm}}^2 - F_m^2}{F_m^2} = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} F_{\text{vm}}^2}{F_m^2} - 1.$$

Для исключения вычисления амплитуд множества гармоник значение коэффициента дифференциального рассеяния определяют по диаграмме Гёргеса. Распределение ампер-проводников A_x обмотки по пазам статора вполне определено и, принимая радиус статора за единицу, МДС обмотки можно представить в виде:

$$F_x e^{j(\omega t + \varphi_x)} = \int_x A_x e^{j(\omega t + \varphi_x)} dx = e^{j\omega t} \int_x A_x e^{j\varphi_x} dx,$$

где φ_x — фаза ампер-проводников в пазу статора с координатой x .

Суммирование пазовых векторов ампер-проводников $A_x e^{j\varphi_x}$ на периоде МДС образует диаграмму Гёргеса. Для

основной гармоники МДС обмотки с $N = 2mw/Z$ проводниками в пазу диаграмма Гёргеса является окружностью радиусом

$$R_p = F_m = \frac{ZN I_{1m} k_{об}}{2\pi r}.$$

Принимая $I_{1m} N = 1$, $R_p = Zk_{об}/2\pi r$, и

$$\tau_d = \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1,$$

где R_d^2 — полярный момент инерции пазовых точек или пазовых вершин диаграммы Гёргеса.

Диаграмму Гёргеса строят по сетке, отображающей фазу токов в сторонах катушек. За условное число пазов статора принимают число сторон катушек с принятым за единицу эффективным числом проводников. Например, радиус основной гармоники МДС двухполюсной обмотки с шагом $y = 12$ ($k_{об} = 0,828$), полярный момент инерции пазовых точек диаграммы Гёргеса и значение коэффициента дифференциального рассеяния (рис. 3.37):

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{Zk_{об}}{2\pi r} = \frac{72 \cdot 0,828}{2 \cdot 3,1416 \cdot 1} = 9,4882; \\ R_d^2 &= [9^2 + 2 \cdot (7^2 + 4^2 - 2 \cdot 7 \cdot 4 \cdot \cos 120^\circ) + \\ &\quad + 2(8^2 + 2^2 - 2 \cdot 8 \cdot 2 \cdot \cos 120^\circ) + \\ &\quad + (6^2 + 6^2 - 2 \cdot 6 \cdot 6 \cdot \cos 120^\circ)]/6 = 90,5; \\ \tau_d &= \frac{R_d^2}{R_p^2} - 1 = \frac{90,5}{9,4882^2} - 1 = 0,00525. \end{aligned}$$

Активное сопротивление статорной обмотки определяет средняя длина витка l_B (м), сечение провода S (мм²), удельное сопротивление меди ($\rho = 0,0174$ Ом·м/мм² при 20°C) и температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha = 0,004$ 1/°C, коэффициент частоты тока. Например, для рабочей температуры обмотки 75°C ($\Delta T = 55^\circ\text{C}$) и коэффициента частоты для 50 Гц $k_f = 1,05$:

$$R_1 = k_f \rho (1 + \alpha \Delta T) l_B w / S = 0,0223 l_B w / S.$$

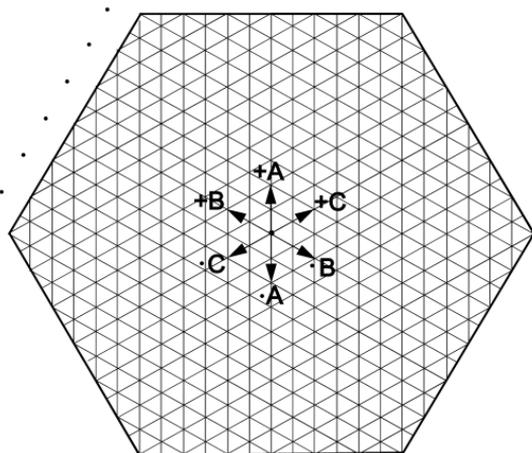
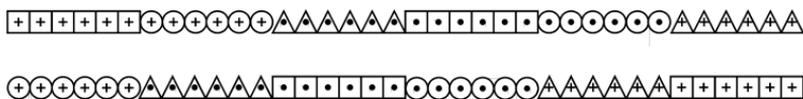


Рис. 3.37

Диаграмма Гёрреса двухслойной двухполюсной обмотки

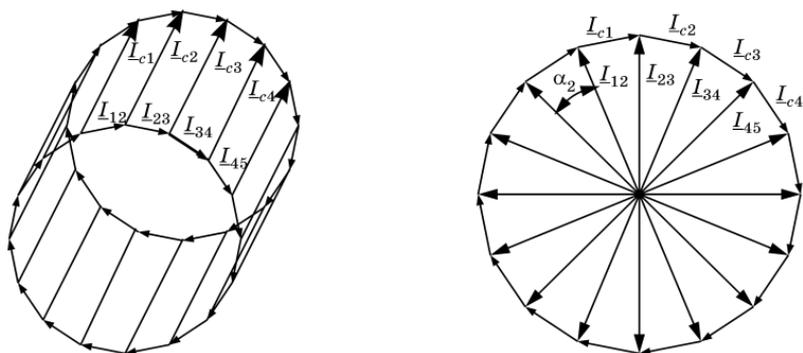


Рис. 3.38

Схема токов в стержнях и в элементах замыкающих колец

Как уже было отмечено ранее, фазную обмотку короткозамкнутого ротора составляют стержень и два элемента замыкающих колец (рис. 3.38, $I_{c1} = I_{c2} = \dots = I_2$ и $I_{12} = I_{23} = \dots = I_{\text{кл}}$).

При расчете активного сопротивления R_2 сопротивление элементов замыкающих колец $2R_{\text{кл}}$ приводят к сопротивлению стержня R_c

$$I_2^2 R_2 = I_c^2 R_c + 2I_{\text{кл}}^2 R_{\text{кл}}.$$

Ток в элементах замыкающих колец при фазовом сдвиге токов в стержнях $\varphi_2 = 2\pi p / Z_2$

$$I_{\text{кл}} = I_{12} = \frac{I_2}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}}.$$

Активное сопротивление стержня, замыкающих колец, приведенное к току стержня, и фазной обмотки ротора:

$$R_c = \frac{l}{\gamma_a Q_c 10^3};$$

$$R_{\text{кл}} = \frac{2\pi D_{\text{к}}}{Z_2 \gamma_a Q_{\text{кл}} \left(2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 10^3};$$

$$R_2 = R_c + R_{\text{кл}} = \frac{l}{\gamma_a Q_c 10^3} + \frac{2\pi D_{\text{к}}}{Z_2 \gamma_a Q_{\text{кл}} \left(2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 10^3},$$

где $D_{\text{к}}$ — средний диаметр замыкающих колец; Q_c и $Q_{\text{кл}}$ — сечение стержня и замыкающего кольца; $\gamma_a = 24 \text{ См/мкм}$ — удельная проводимость алюминия при температуре 75°C .

Диаграмму Гёргеса в виде правильного многоугольника образуют токи стержней. Радиус инерции вершин многоугольника равен максимальному току в элементах замыкающих колец

$$R_{\text{л2}} = I_{\text{кл}} = \frac{\sqrt{2} I_2}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}}.$$

Радиус основной гармоники МДС и коэффициент дифференциального рассеяния роторной обмотки:

$$R_{p2} = F_{2m} = \frac{m_2 \sqrt{2} I_2 w_2}{\pi p} = \frac{Z_2 \sqrt{2} I_2}{2\pi p};$$

$$\tau_{д2} = \frac{R_{д2}^2}{R_{p2}^2} - 1 = \frac{(\pi p)^2}{\left(Z_2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2} - 1.$$

Для неподвижного ротора и длине стали, равной длине статора $l_2 = l$, составляющая индуктивного сопротивления роторной обмотки от потока пазового рассеяния (число проводников $N_{\Pi} = 1$)

$$x_{\Pi 2} = \omega \mu_0 l \lambda_{\Pi 2} = 2\pi f \mu_0 l \lambda_{\Pi 2}.$$

При расчете индуктивного сопротивления роторной обмотки от потока рассеяния элементов замыкающих колец используют эмпирическую формулу, в которой длина элемента замыкающих колец приведена к выступающей длине кольца $l_{\text{кл}} = Q_{\text{кл}}/h_{\text{кл}}$, а ток в элементах замыкающих колец приведен к току стержня:

$$x_{\text{кл}2} = 2\pi f \mu_0 l \lambda_{\text{кл}2} = 2\pi f \mu_0 l \frac{2,3 D_{\text{к}}}{Z_2 l \left(2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2} \lg \frac{4,7 D_{\text{к}}}{2h_{\text{кл}} + 2l_{\text{кл}}},$$

где

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2,3 D_{\text{к}}}{Z_2 l \left(2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2} \lg \frac{4,7 D_{\text{к}}}{2h_{\text{кл}} + 2l_{\text{кл}}}$$

— коэффициент проводимости элементов замыкающих колец ($h_{\text{кл}} \approx 1,15 h_{\text{п}2}$ — высота замыкающего кольца, $h_{\text{п}2}$ — высота паза ротора).

Составляющая индуктивного сопротивления роторной обмотки от потока дифференциального рассеяния

$$x_{д2} = 2\pi f \mu_0 l \lambda_{д2},$$

где

$$\lambda_{д2} = \frac{0,9 t_2 \left(\frac{Z_2}{6p} \right)^2}{\delta k_{\delta}} \cdot \tau_{д2}$$

— коэффициент проводимости дифференциального рассеяния ($t_2 = \pi D_2 / Z_2$ — зубцовое деление ротора, D_2 — диаметр ротора).

Составляющая индуктивного сопротивления роторной обмотки от потока рассеяния скоса пазов

$$x_{\text{СК}} = 2\pi f \mu_0 l \lambda_{\text{СК}},$$

где коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов

$$\lambda_{\text{СК}} = \frac{t_2 (b_{\text{СК}} / t_2)^2}{9,5 \delta k_{\delta} k_{\mu}}.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки

$$x_2 = 2\pi f \mu_0 l \lambda_2 = 7,9 fl \lambda_2 = 7,9 fl (\lambda_{\text{П2}} + \lambda_{\text{Д2}} + \lambda_{\text{КЛ}} + \lambda_{\text{СК}}) \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Для другой гармоники ν ($R_{\text{СВ}} = R_{\text{С}}$, $\lambda_{\text{П2V}} = \lambda_{\text{П2}}$ и $\lambda_{\text{СКV}} = \lambda_{\text{СК}}$):

$$R_{2\nu} = R_{\text{С}} + R_{\text{КЛV}} = \frac{l}{\gamma_{\text{а}} Q_{\text{С}} \cdot 10^3} + \frac{2\pi D_{\text{К}}}{Z_2 \gamma_{\text{а}} Q_{\text{КЛ}} \left(2 \sin \frac{\pi \nu}{Z_2}\right)^2 \cdot 10^3};$$

$$x_{2\nu} = 7,9 fl (\lambda_{\text{П2}} + \lambda_{\text{Д2V}} + \lambda_{\text{КЛV}} + \lambda_{\text{СК}}) \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

где

$$\lambda_{\text{КЛV}} = \frac{2,3 D_{\text{К}}}{Z_2 l \left(2 \sin \frac{\pi \nu}{Z_2}\right)^2} \lg \frac{4,7 D_{\text{К}}}{2 h_{\text{КЛ}} + 2 l_{\text{КЛ}}};$$

$$\lambda_{\text{Д2V}} = \frac{0,9 t_2 \left(\frac{Z_2}{6\nu}\right)^2}{\delta k_{\delta}} \cdot \tau_{\text{Д2V}} = \frac{0,9 t_2 \left(\frac{Z_2}{6\nu}\right)^2}{\delta k_{\delta}} \cdot \left(\frac{(\pi \nu)^2}{\left(Z_2 \sin \frac{\pi \nu}{Z_2}\right)^2} - 1 \right).$$

Методика расчета параметров двигателей с разной формой пазов статора и ротора и разными типами статорных обмоток приводится в литературе по проектированию электрических машин.

Справочные данные о параметрах двигателей в относительных единицах в номинальном режиме работы и при пуске приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Параметры двигателей в относительных единицах (U_n/I_n)

Типоразмер двигателя	I_n, A	x_μ	В номинальном режиме				При пуске ($s = 1$)		
			R_1	x_1	R'_2	x'_2	R'_{2n}	R_k	x_k
АИР71В2	2,55	2,8	0,13	0,054	0,069	0,094	0,070	0,20	0,11
АИР80А2	3,3	2,5	0,084	0,051	0,049	0,081	0,050	0,13	0,10
АИР80В2	4,6	2,7	0,076	0,050	0,049	0,087	0,050	0,13	0,01
АИР90L2	6,1	3,4	0,072	0,057	0,047	0,10	0,048	0,12	0,11
АИР100S2	7,9	3,4	0,054	0,055	0,036	0,099	0,038	0,091	0,11
АИР100L2	10,7	3,8	0,050	0,054	0,036	0,11	0,038	0,087	0,10
АИР112M2	14,7	3,7	0,046	0,06	0,028	0,09	0,032	0,078	0,11
АИР132M2	21,1	4,2	0,040	0,061	0,025	0,12	0,028	0,068	0,12
АИР160S2	28,5	4,0	0,052	0,092	0,022	0,12	0,029	0,081	0,16
АИР160M2	34,5	4,5	0,049	0,092	0,022	0,12	0,030	0,079	0,16
АИР180S2	41,5	3,6	0,039	0,091	0,020	0,11	0,026	0,065	0,15
АИР180M2	55,4	3,8	0,030	0,073	0,018	0,11	0,024	0,054	0,13
АИР200M2	71	4,1	0,029	0,094	0,021	0,12	0,031	0,060	0,16
АИР200L2	84,5	4,9	0,027	0,088	0,020	0,13	0,031	0,058	0,15
АИР225M2	99,3	5,6	0,026	0,092	0,019	0,12	0,029	0,055	0,16
АИР250S2	135	4,8	0,021	0,080	0,015	0,13	0,029	0,050	0,16
АИР250M2	160	5,2	0,020	0,078	0,016	0,13	0,030	0,050	0,16
АИР71В4	1,9	1,5	0,11	0,084	0,11	0,20	0,11	0,23	0,22
АИР80А4	2,75	1,7	0,12	0,078	0,068	0,12	0,071	0,20	0,14
АИР80В4	3,5	1,9	0,12	0,078	0,069	0,12	0,072	0,19	0,15
АИР90L4	5,0	2,1	0,098	0,076	0,060	0,13	0,063	0,16	0,14
АИР100S4	6,7	2,2	0,078	0,079	0,053	0,13	0,067	0,14	0,14
АИР100L4	8,5	2,4	0,067	0,079	0,053	0,14	0,058	0,13	0,15
АИР112M4	11,3	2,8	0,64	0,078	0,041	0,13	0,048	0,11	0,14
АИР132S4	15	3,0	0,048	0,085	0,033	0,13	0,040	0,088	0,15
АИР132M4	22,2	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13	0,039	0,082	0,15
АИР160S4	28,5	4,0	0,047	0,086	0,025	0,13	0,038	0,085	0,15
АИР160M4	35	4,3	0,042	0,085	0,024	0,13	0,037	0,079	0,14
АИР180S4	42,5	4,0	0,041	0,080	0,021	0,12	0,034	0,076	0,15

Продолжение табл. 3.4

Типоразмер двигателя	I_n, A	x_μ	В номинальном режиме				При пуске ($s = 1$)		
			R_1	x_1	R'_2	x'_2	$R'_{2н}$	R_k	x_k
АИР180М4	57	3,9	0,034	0,068	0,018	0,12	0,031	0,064	0,13
АИР200М4	68	4,4	0,039	0,086	0,018	0,14	0,035	0,074	0,16
АИР200L4	83	4,6	0,034	0,082	0,017	0,14	0,034	0,069	0,16
АИР225М4	101	4,2	0,027	0,086	0,015	0,14	0,030	0,058	0,15
АИР250S4	138	4,4	0,025	0,089	0,014	0,11	0,027	0,052	0,15
АИР250М4	163	5,0	0,024	0,093	0,014	0,12	0,029	0,054	0,15
АИР71В6	1,75	1,4	0,16	0,11	0,15	0,17	0,15	0,31	0,24
АИР80А6	2,3	1,5	0,16	0,12	0,12	0,20	0,12	0,28	0,25
АИР80В6	3,0	1,6	0,12	0,11	0,11	0,19	0,11	0,23	0,24
АИР90L6	4,2	1,8	0,11	0,11	0,088	0,21	0,093	0,20	0,23
АИР100L6	5,5	1,9	0,090	0,11	0,067	0,21	0,073	0,16	0,22
АИР112МА6	7,4	1,9	0,085	0,074	0,063	0,10	0,069	0,16	0,14
АИР112МВ6	9,1	2,0	0,077	0,073	0,062	0,11	0,068	0,15	0,14
АИР132S6	12,3	1,9	0,067	0,072	0,041	0,11	0,050	0,12	0,14
АИР132М6	16,5	2,1	0,060	0,070	0,040	0,11	0,050	0,11	0,14
АИР160S6	23	3,0	0,073	0,11	0,030	0,15	0,047	0,12	0,18
АИР160М6	31	3,0	0,062	0,10	0,028	0,16	0,045	0,11	0,19
АИР180М6	37	2,9	0,056	0,11	0,026	0,13	0,046	0,10	0,18
АИР200М6	45	4,1	0,050	0,11	0,024	0,14	0,042	0,092	0,17
АИР200L6	60	3,7	0,046	0,12	0,022	0,13	0,040	0,085	0,16
АИР225М6	73	3,7	0,042	0,10	0,019	0,13	0,035	0,078	0,16
АИР250S6	87	3,8	0,037	0,090	0,015	0,14	0,032	0,069	0,16
АИР250М6	105	3,4	0,034	0,083	0,014	0,13	0,030	0,064	0,15
АИР71В8	1,04	1,2	0,22	0,18	0,23	0,28	0,23	0,45	0,43
АИР80В8	2,1	1,3	0,19	0,16	0,16	0,29	0,16	0,35	0,40
АИР90LА8	2,1	1,3	0,17	0,16	0,15	0,29	0,16	0,33	0,38
АИР90LВ8	3,0	1,3	0,14	0,15	0,11	0,29	0,12	0,26	0,35
АИР100L8	4,0	1,4	0,13	0,15	0,11	0,30	0,12	0,24	0,35
АИР112МА8	6,2	1,5	0,11	0,16	0,093	0,32	0,10	0,21	0,35
АИР112МВ8	7,8	1,5	0,093	0,11	0,083	0,17	0,094	0,19	0,22
АИР132S8	10,5	1,6	0,080	0,11	0,083	0,17	0,091	0,17	0,21
АИР132М8	13,6	1,6	0,068	0,10	0,058	0,17	0,069	0,14	0,21

Продолжение табл. 3.4

Типоразмер двигателя	I_n, A	x_p	В номинальном режиме				При пуске ($s = 1$)		
			R_1	x_1	R'_2	x'_2	$R'_{2н}$	R_k	x_k
АИР160S8	17,5	1,8	0,070	0,11	0,061	0,19	0,073	0,14	0,23
АИР160M8	26	2,0	0,075	0,14	0,032	0,18	0,053	0,13	0,20
АИР180M8	31	2,0	0,065	0,13	0,031	0,18	0,053	0,12	0,19
АИР200M8	39	2,4	0,064	0,13	0,030	0,17	0,057	0,12	0,22
АИР200L8	46	2,6	0,057	0,13	0,026	0,16	0,049	0,11	0,19
АИР225M8	62	3,1	0,062	0,14	0,029	0,18	0,055	0,12	0,21
АИР250S8	78	2,3	0,045	0,12	0,022	0,17	0,044	0,090	0,19
АИР250M8	94	2,8	0,047	0,11	0,017	0,18	0,042	0,088	0,20

На основе параметров таблицы 3.4 (с учетом коэффициента c) можно рассчитать пусковой ток и пусковой момент двигателя, а также и их кратности ($R_k = R_1 + cR'_2$):

$$M_{п} = \frac{mU^2 R'_2}{\omega_1 (R_k^2 + x_k^2)};$$

$$k_{п} = \frac{M_{п}}{M_{н}};$$

$$I_{1п} = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + x_k^2}};$$

$$k_i = \frac{I_{1п}}{I_{1н}},$$

где $M_{н}$ и $I_{1н}$ — номинальный момент и номинальный ток двигателя.

Сопротивление $Z_k = R_k + jx_k$ называется сопротивлением короткого замыкания двигателя (сопротивлением при скольжении $s = 1$).

Расчет параметров двигателя АИР112М2 (относительная единица $U_{н}/I_{1н} = 220/14,7 \approx 15$).

Активное и индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = 0,046 \cdot 15 = 0,69 \text{ Ом};$$

$$x_1 = 0,06 \cdot 15 = 0,90 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное и индуктивное сопротивление роторной обмотки:

$$R'_2 = 0,028 \cdot 15 = 0,42 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = 0,09 \cdot 15 = 1,35 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное сопротивление роторной обмотки при пуске:

$$R'_{2п} = 0,032 \cdot 15 = 0,48 \text{ Ом}.$$

Активное и индуктивное сопротивление при пуске:

$$R_{к} = 0,078 \cdot 15 = 1,17 \text{ Ом};$$

$$x_{к} = 0,11 \cdot 15 = 1,65 \text{ Ом}.$$

Пусковой ток и его кратность:

$$I_{1п} = \frac{U}{\sqrt{R_{к}^2 + x_{к}^2}} = \frac{220}{\sqrt{1,17^2 + 1,65^2}} = 109 \text{ А};$$

$$k_i = \frac{I_{1п}}{I_{1н}} = \frac{109}{14,7} = 7,41.$$

Пусковой момент двигателя и его кратность (номинальный момент $M_{н} = 9,55 P_{2н} / n_{2н} = 9,55 \cdot 7500 / 2895 = 24,7 \text{ Нм}$):

$$M_{п} = \frac{m U^2 R'_{2п}}{\omega_1 (R_{к}^2 + x_{к}^2)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,48}{314 \cdot (1,17^2 + 1,65^2)} \approx 55 \text{ Нм};$$

$$k_m = \frac{M_{п}}{M_{н}} = \frac{55}{24,7} = 2,2.$$

Расчет параметров двигателя АИР160S4 ($U_{н}/I_{1н} = 220/28,5 = 7,72$).

Активное и индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = 0,047 \cdot 7,72 = 0,36 \text{ Ом};$$

$$x_1 = 0,086 \cdot 7,72 = 0,66 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное и индуктивное сопротивление роторной обмотки:

$$R'_2 = 0,025 \cdot 7,72 = 0,19 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = 0,13 \cdot 7,72 = 1,0 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное сопротивление роторной обмотки при пуске:

$$R'_{2п} = 0,038 \cdot 7,72 = 0,294 \text{ Ом.}$$

Активное и индуктивное сопротивление при пуске:

$$R_{\text{к}} = 0,085 \cdot 7,72 = 0,66 \text{ Ом;}$$

$$x_{\text{к}} = 0,15 \cdot 7,72 = 1,16 \text{ Ом.}$$

Пусковой ток и его кратность:

$$I_{1п} = \frac{U}{\sqrt{R_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,66^2 + 1,16^2}} = 165 \text{ А;}$$

$$k_i = \frac{I_{1п}}{I_{1н}} = \frac{165}{28,5} = 5,8.$$

Пусковой момент и его кратность ($M_{\text{н}} = 9,55P_{2\text{н}}/n_{2\text{н}} = 9,55 \cdot 15\,000/1455 = 98,5 \text{ Нм}$):

$$M_{\text{п}} = \frac{mU^2 R'_{2п}}{\omega_1 (R_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,294}{157 \cdot (0,66^2 + 1,16^2)} = 153 \text{ Нм;}$$

$$k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = \frac{153}{98,5} = 1,55.$$

Технические данные двигателей базовой серии АИР приведены в таблице 3.5 ($k_{\text{м}}$ — кратность максимального момента, J — момент инерции ротора, G — масса двигателя).

Таблица 3.5

Технические данные двигателей серии АИР

Типоразмер двигателя	$P_{2\text{н}}$, кВт	$n_{2\text{н}}$, об/мин	$I_{1\text{н}}$, А	КПД, %	$\cos\varphi_{\text{н}}$	k_i	k_n	$k_{\text{м}}$	J , кгм ²	G , кг
АИР71А2	0,75	2820	1,75	79	0,80	6,0	2,6	2,7	10^{-4}	8,6
АИР71В2	1,1	2805	2,55	79,5	0,80	6,0	2,2	2,4	10^{-3}	9,3
АИР80А2	1,5	2850	3,3	81	0,85	6,5	2,2	2,6	$18 \cdot 10^{-4}$	13
АИР80В2	2,2	2850	4,6	83	0,87	6,4	2,1	2,6	$21 \cdot 10^{-4}$	15
АИР90L2	3,0	2850	6,1	84,5	0,88	7,0	2,0	2,2	$35 \cdot 10^{-4}$	19
АИР100S2	4,0	2850	7,9	87	0,88	7,5	2,0	2,4	$55 \cdot 10^{-4}$	26
АИР100L2	5,5	2850	10,7	88	0,89	7,5	2,1	2,4	0,007	31
АИР112M2	7,5	2895	14,7	88	0,88	7,5	2,0	2,2	0,01	49

Продолжение табл. 3.5

Типоразмер двигателя	$P_{2н}$, кВт	$n_{2н}$, об/мин	$I_{1н}$, А	КПД, %	$\cos\varphi_n$	k_i	k_n	k_m	J , кгм ²	G , кг
АИР132М2	11	2910	21,1	88	0,90	7,5	1,6	2,2	0,023	78
АИР160S2	15	2910	28,5	90	0,89	7,0	1,8	2,7	0,043	125
АИР160М2	18,5	2910	34,5	90,5	0,90	7,0	2,0	2,7	0,048	140
АИР180S2	22	2920	41,5	90,5	0,89	7,0	2,0	2,7	0,063	160
АИР180М2	30	2925	55,4	91,5	0,90	7,5	2,2	3,0	0,076	180
АИР200М2	37	2940	71	91	0,87	7,0	1,6	2,8	0,12	220
АИР200L2	45	2940	84,5	92	0,88	7,5	1,8	2,8	0,13	240
АИР225М2	55	2940	99,3	92,5	0,91	7,5	1,8	2,6	0,20	320
АИР250S2	75	2940	135	93	0,91	7,5	1,8	3,0	0,47	425
АИР250М2	90	2940	160	93	0,92	7,5	1,8	3,0	0,52	455
АИР71А4	0,55	1350	1,6	70,5	0,73	5,0	2,3	2,4	0,0013	8,3
АИР71В4	0,75	1350	1,9	75	0,80	5,0	2,5	2,6	0,0015	9,4
АИР80А4	1,1	1395	2,75	76,5	0,77	5,0	2,2	2,4	0,0034	12
АИР80В4	1,5	1395	3,5	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	0,0035	14
АИР90L4	2,2	1395	5,0	81	0,81	6,5	2,2	2,4	0,0056	19
АИР100S4	3,0	1410	6,7	82	0,82	7,0	2,0	2,2	0,0085	23
АИР100L4	4,0	1410	8,5	85	0,84	6,0	2,1	2,4	0,011	29
АИР112М4	5,5	1430	11,3	86	0,86	6,0	2,0	2,5	0,016	49
АИР132S4	7,5	1440	15	87,5	0,86	7,5	2,0	2,5	0,027	70
АИР132М4	11	1450	22,2	88,5	0,85	7,5	2,2	3,1	0,038	84
АИР160S4	15	1455	28,5	90	0,89	7,0	1,9	2,9	0,080	130
АИР160М4	18,5	1455	35	90,5	0,89	7,0	1,9	2,9	0,10	145
АИР180S4	22	1465	42,5	90,5	0,87	7,0	1,7	2,7	0,16	170
АИР180М4	30	1470	57	92	0,87	7,0	1,7	2,7	0,20	190
АИР200М4	37	1470	68	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,27	245
АИР200L4	45	1470	83	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,32	270
АИР225М4	55	1470	101	93	0,89	7,0	1,7	2,6	0,50	335
АИР250S4	75	1480	138	94	0,88	7,5	1,7	2,5	1,0	450
АИР250М4	90	1480	163	94	0,89	7,5	1,5	2,5	1,2	480
АИР71А6	0,37	915	1,3	66	0,63	4,5	2,1	2,3	$19 \cdot 10^{-4}$	8,1
АИР71В6	0,55	915	1,75	69	0,68	4,5	1,9	2,2	$23 \cdot 10^{-4}$	9,7
АИР80А6	0,75	920	2,3	71	0,71	4,0	2,1	2,3	$33 \cdot 10^{-4}$	13

Продолжение табл. 3.5

Типоразмер двигателя	$P_{2н}$, кВт	$n_{2н}$, об/мин	$I_{1н}$, А	КПД, %	$\cos\phi_n$	k_i	k_n	k_m	J , кгм ²	G , кг
АИР80В6	1,1	920	3,0	75	0,74	4,5	2,2	2,2	48·10 ⁻⁴	16
АИР90Л6	1,5	925	4,2	76	0,72	6,0	2,0	2,2	73·10 ⁻⁴	19
АИР100Л6	2,2	945	5,5	81,5	0,74	6,0	1,9	2,2	0,013	27
АИР112МА6	3,0	950	7,4	81,5	0,76	6,0	2,0	2,2	0,017	43
АИР112МВ6	4,0	950	9,1	82,5	0,81	6,0	2,0	2,2	0,021	48
АИР132S6	5,5	960	12,3	85	0,80	7,0	2,0	2,2	0,038	69
АИР132М6	7,5	960	16,5	85,5	0,81	7,0	2,0	2,2	0,055	82
АИР160S6	11	970	23	88	0,83	6,5	2,0	2,7	0,12	125
АИР160М6	15	970	31	88	0,85	6,5	2,0	2,7	0,15	155
АИР180М6	18,5	980	37	89,5	0,85	6,5	1,8	2,4	0,24	180
АИР200М6	22	980	45	90	0,83	6,5	1,6	2,4	0,41	225
АИР200Л6	30	975	60	90	0,85	6,5	1,6	2,4	0,46	250
АИР225М6	37	980	73	91	0,85	6,5	1,5	2,3	0,64	305
АИР250S6	45	980	87	92,5	0,85	6,5	1,5	2,3	1,1	390
АИР250М6	55	980	105	92,5	0,86	6,5	1,5	2,3	1,2	430
АИР71В8	0,25	690	1,04	61	0,60	4,0	1,8	1,9	21·10 ⁻⁴	8,9
АИР80А8	0,37	700	1,5	63,5	0,59	3,5	2,0	2,3	36·10 ⁻⁴	12
АИР80В8	0,55	700	2,1	65	0,60	3,5	2,0	2,1	47·10 ⁻⁴	13
АИР90ЛА8	0,75	705	2,1	75	0,73	4,0	1,4	2,0	75·10 ⁻⁴	19
АИР90ЛВ8	1,1	700	3,0	77	0,72	3,5	1,4	2,0	96·10 ⁻⁴	22
АИР100Л8	1,5	705	4,0	76	0,75	3,7	1,6	2,0	0,012	24
АИР112МА8	2,2	710	6,2	76,5	0,71	6,0	1,8	2,2	0,017	44
АИР112МВ8	3,0	700	7,8	79	0,74	6,0	1,8	2,2	0,025	49
АИР132S8	4,0	720	10,5	83	0,70	6,0	1,8	2,2	0,042	69
АИР132М8	5,5	715	13,6	83	0,74	6,0	1,8	2,2	0,057	82
АИР160S8	7,5	730	17,5	87	0,75	5,5	1,6	2,4	0,12	125
АИР160М8	11	730	26	87,5	0,75	6,0	1,6	2,4	0,15	155
АИР180М8	15	730	31	89	0,82	5,5	1,6	2,2	0,25	180
АИР200М8	18,5	730	39	89	0,81	6,0	1,6	2,3	0,41	225
АИР200Л8	22	730	46	90	0,81	6,0	1,6	2,3	0,46	250
АИР225М8	30	730	62	90,5	0,81	6,0	1,4	2,3	0,69	305
АИР250S8	37	735	78	92,5	0,78	6,0	1,5	2,3	1,2	400
АИР250М8	45	735	94	92,5	0,79	6,0	1,4	2,2	1,3	430

Большая кратность пускового тока является определенным недостатком короткозамкнутых двигателей.

Если прямой пуск вызывает большое падение напряжения в сети, а также для исключения ударов в механических передачах при пуске, снижают подводимое к двига-

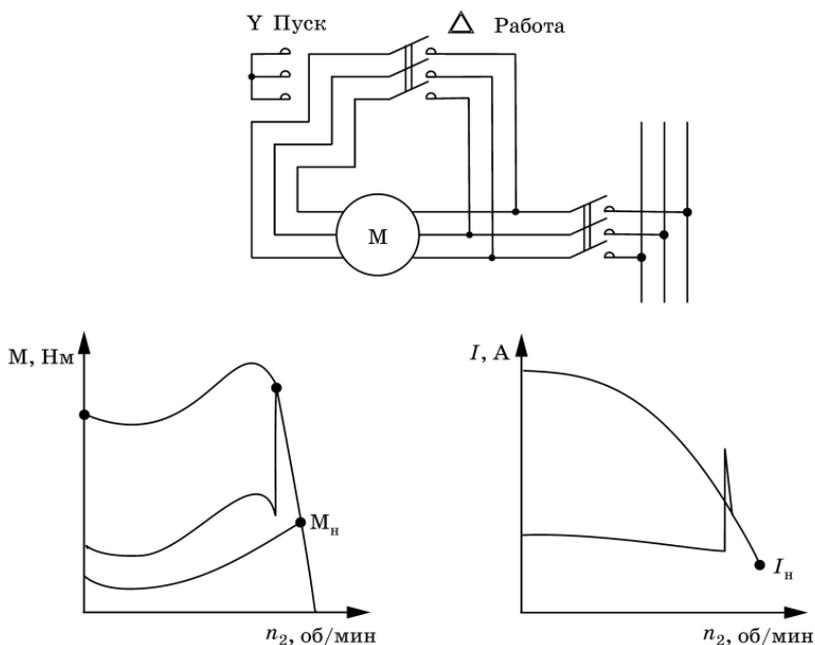


Рис. 3.39

Схема переключения Y/Δ, вид моментов и тока

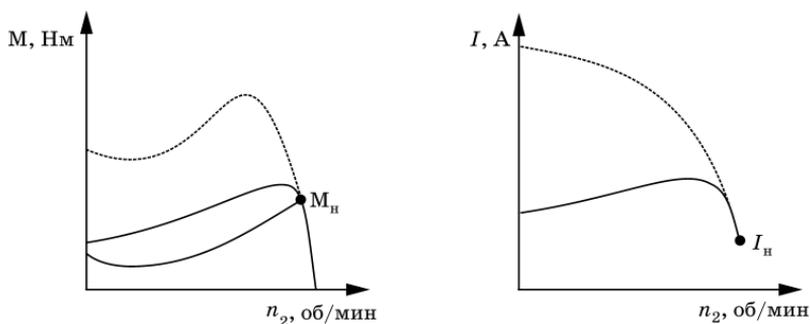


Рис. 3.40

Вид моментов и тока при плавном пуске

телю напряжение. С этой целью двигатели выпускают на напряжение 380(Δ)/660(Υ) В с переключением обмотки по схеме Υ/Δ (рис. 3.39, на примере привода насоса). При включении в сеть обмотки по схеме звезды линейный пусковой ток двигателя уменьшается практически в три раза, при этом в той же степени уменьшается и пропорциональный квадрату напряжения пусковой момент. Способ применим при пуске двигателя вхолостую или при незначительной нагрузке.

Для уменьшения пускового тока разработаны и устройства плавного пуска, силовым элементом которых является ключ из встречно параллельно включенных тиристоров в каждой фазе. Изменяя угол управления тиристоров, снижают подводимое к двигателю напряжение (рис. 3.40). После разбега питание двигателя осуществляется через аппарат, шунтирующий коммутатор.

3.7. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КПД ДВИГАТЕЛЯ

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют зависимость тока I_1 , коэффициента мощности $\cos\varphi$, КПД η , скольжения s и потребляемой мощности P_1 от мощности на валу P_2 .

При проектировании двигателей они задаются определенным отношением постоянных потерь (потерь в стали и механических) $P_0 = P_c + P_m$ к переменным потерям (потерям в обмотках статора и ротора) $P_k = P_{эл1} + P_{эл2}$. КПД двигателя при степени загрузки k_3 :

$$\eta = \frac{k_3 P_{2H}}{k_3 P_{2H} + P_0 + k_3^2 P_{KH}}$$

Исследуя функцию

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{dk_3} &= \frac{k_3 P_{2H}}{k_3 P_{2H} + P_0 + k_3^2 P_{KH}} = \\ &= \frac{P_{2H} (k_3 P_{2H} + P_0 + k_3^2 P_{KH}) - k_3 P_{2H} (P_{2H} + 2k_3 P_{KH})}{(k_3 P_{2H} + P_0 + k_3^2 P_{KH})^2} = 0, \end{aligned}$$

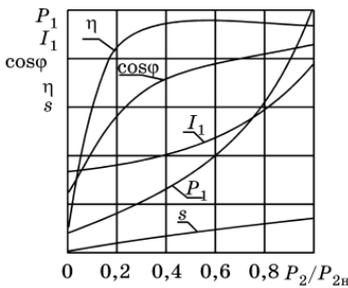


Рис. 3.41
Рабочие характеристики
двигателя

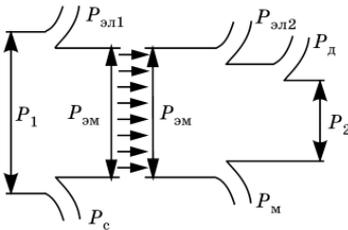


Рис. 3.42
Энергетическая диаграмма
двигателя

ванные поперечной пульсацией потока из-за зубчатости статора и ротора (рис. 3.42).

Потери в стали и потери механические определяют из опыта холостого хода двигателя с понижением подводимого напряжения, измеряя мощность P_0 и ток холостого хода I_0 . Мощность холостого хода двигателя $P_0 = mI_0^2 R_1 + (P_с + P_м)$, откуда $(P_с + P_м) = P_0 - mI_0^2 R_1$. Потери в стали пропорциональны квадрату индукции, следовательно, квадрату напряжения, и зависимость $(P_с + P_м) = f(U^2)$ становится практически линейной. Ее пересечение с осью ординат определяет механические потери $P_м$, а с их учетом и потери в стали $P_с$ при номинальном напряжении (рис. 3.43).

Потери от реактивной мощности в сетях относят к техническим потерям. При оценке же эксплуатационного КПД асинхронного двигателя потери в сетях от реактивного тока приведут к потерям двигателя посредством экономического эквивалента реактивной мощности k (кВт/квар).

а при отличном от нуля знаменателе

$$P_{2н} (k_3 P_{2н} + P_0 + k_3^2 P_{кн}) - k_3 P_{2н} (P_{2н} + 2k_3 P_{кн}) = 0,$$

находим степень загрузки, определяющую максимум КПД,

$$k_3 = \sqrt{P_0 / P_{кн}}.$$

Вид рабочих характеристик показан на рисунке 3.41.

Мощность P_2 отличается от мощности P_1 на сумму потерь, включающую потери в статорной обмотке $P_{э1} = m(I_1)^2 R_1$, потери в стали $P_с$, потери в обмотке ротора $P_{э2} = (I_2)^2 R_2 = (P_1 - P_{э1} - P_с)s = P_{э} s$, потери механические $P_м$, потери добавочные $P_д \approx 0,005 P_1$, выз-

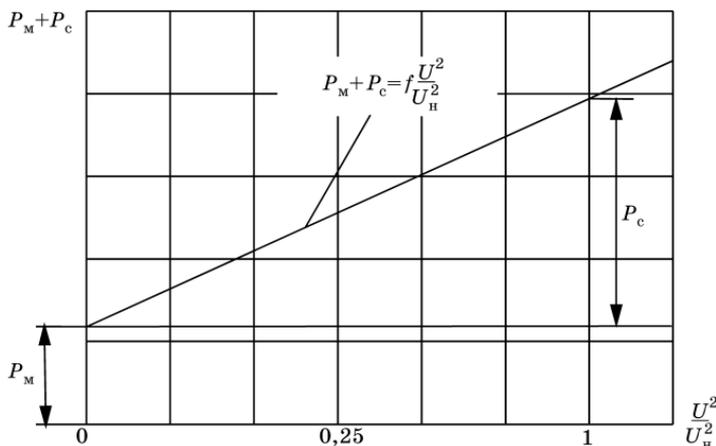


Рис. 3.43
Разделение потерь ($P_c + P_M$) на составляющие

В зависимости от разветвленности сети и ее загруженности $k = 0,1-0,2$ кВт/квар.

Реактивную мощность двигателя составляет мощность холостого хода Q_0 и ее приращение ΔQ при коэффициенте загрузки k_3 :

$$Q = Q_0 + \Delta Q = \frac{P_{2н}}{\eta_n} \cdot \frac{I_\mu}{I_{1на}} + \left(\frac{P_{2н}}{\eta_n} \operatorname{tg} \varphi_n - \frac{P_{2н}}{\eta_n} \cdot \frac{I_\mu}{I_{1на}} \right) k_3^2 = \\ = \frac{P_{2н}}{\eta_n} [n + (\operatorname{tg} \varphi_n - n) k_3^2],$$

где $\operatorname{tg} \varphi_n$ — тангенс номинального угла мощности; $n = I_\mu / I_{1на}$ — отношение намагничивающего тока к активной составляющей номинального тока.

В приведенном виде потери:

$$P_{прив} = P_0 + k_3^2 P_{эл} + kQ,$$

где P_0 — потери в стали и механические, $P_{эл}$ — потери электрические.

Обозначив $P_0 / P_{эл} = \gamma$, и учитывая, что

$$P_0 + k_3^2 P_{эл} = P_{2н} \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{\gamma + k_3^2}{\gamma + 1} = \frac{P_{2н}}{\eta_n} \cdot \frac{1 - \eta_n}{\gamma + 1} \cdot (\gamma + k_3^2)$$

и

$$P_{\text{прив}} = \frac{P_{2\text{H}}}{\eta_{\text{H}}} \left[\frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\gamma + 1} \cdot (\gamma + k_3^2) + kn + k(\text{tg}\varphi_{\text{H}} - n)k_3^2 \right],$$

приведенный или эксплуатационный КПД асинхронного двигателя

$$\begin{aligned} \eta_{\text{H}} &= \frac{k_3 P_{2\text{H}}}{k_3 P_{2\text{H}} + \frac{P_{2\text{H}}}{\eta_{\text{H}}} \left[\frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\gamma + 1} \cdot (\gamma + k_3^2) + kn + k(\text{tg}\varphi_{\text{H}} - n)k_3^2 \right]} = \\ &= \frac{k_3 \eta_{\text{H}}}{k_3 \eta_{\text{H}} + \frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\gamma + 1} \cdot (\gamma + k_3^2) + kn + k(\text{tg}\varphi_{\text{H}} - n)k_3^2}. \end{aligned}$$

Так, для двигателя АИР112М2 ($I_{1\text{H}} = 14,7$ А, $I_{\mu} = 5,1$ А, $\cos\varphi_{\text{H}} = 0,88$, $\eta_{\text{H}} = 0,88$, $P_{\text{эл}} = 610$ Вт, $P_0 = 395$ Вт), у которого

$$\text{tg}\varphi_{\text{H}} = 0,54;$$

$$\gamma = 0,65;$$

$$n = 0,4;$$

$$(1 - \eta_{\text{H}})/(1 + \gamma) = 0,073,$$

например при коэффициенте загрузки $k_3 = 0,5$ и значении экономического эквивалента реактивной мощности $k = 0,15$ кВт/квар эксплуатационный КПД

$$\begin{aligned} \eta_{\text{H}} &= \frac{k_3 \eta_{\text{H}}}{k_3 \eta_{\text{H}} + \left(\frac{1 - \eta_{\text{H}}}{1 + \gamma} \right) (\gamma + k_3^2) + kn(1 - k_3^2) + k_3^2 k \cdot \text{tg}\varphi_{\text{H}}} = \\ &= \frac{0,5 \cdot 0,88}{0,5 \cdot 0,88 + 0,073 \cdot (0,65 + 0,5^2) + 0,15 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,5^2) + 0,5^2 \cdot 0,15 \cdot 0,54} = 0,77. \end{aligned}$$

3.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПО КРУГОВОЙ ДИАГРАММЕ ТОКОВ

Характеристики крупных асинхронных двигателей из-за сложности испытания непосредственно нагрузкой определяют по круговой диаграмме токов, построенной по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Круговая диаграмма дает достоверные данные о характеристиках в пределах скольжения от $s = 0$ до $s = s_{\text{к}}$.

В основу построения круговой диаграммы положена Г-образная схема замещения двигателя.

Согласно схеме замещения

$$\underline{U} = \underline{I}_2'' \left(cR_1 + c^2 \frac{R_2'}{s} \right) + jI_2''(cx_1 + c^2x_2') = \underline{I}_2''R_{\text{кс}} + jI_2''x_{\text{к}}.$$

Разделив это выражение на $jx_{\text{к}}$, получаем

$$-j \frac{U}{x_{\text{к}}} = -jI_2'' \frac{R_{\text{кс}}}{x_{\text{к}}} + I_2''.$$

Конец вектора тока I_2'' , как вершина прямоугольного треугольника, опирающегося на гипотенузу $U/x_{\text{к}}$, при изменении скольжения будет описывать окружность. Прибавляя к вектору I_2'' вектор тока I_{00} , находим вектор тока I_1 . Его конец будет скользить по той же окружности, что и вектор тока I_2'' .

Из опыта холостого хода при номинальном напряжении определяют коэффициент мощности

$$\cos\varphi_0 = P_0/mU_{\text{н}}I_0,$$

намагничивающий ток

$$I_{\mu} = I_0 \sin\varphi_0,$$

активную составляющую тока идеального холостого хода

$$I_{00a} = P_c/mU_{\text{н}},$$

а также:

- ток идеального холостого хода

$$I_{00} = \sqrt{I_{00a}^2 + I_{\mu}^2};$$

- сопротивления

$$R_1 + R_0 = R_1 + P_c / (m(I_{00a})^2);$$

$$x_1 + x_0 = \sqrt{(U_{\text{н}} / I_{00})^2 - (R_1 + R_0)^2};$$

- угол

$$\gamma = \arctg \frac{R_1 x_0 - R_0 x_1}{R_0(R_1 + R_0) + x_0(x_1 + x_0)}.$$

Опыт короткого замыкания двигателя проводят при заторможенном роторе и напряжении U_K соответствующем номинальному току. По напряжению и мощности короткого замыкания P_K определяют составляющие сопротивления короткого замыкания:

$$R_K = P_K / (m(I_{1H})^2);$$

$$x_K = \sqrt{(U_K / I_{1H})^2 - R_K^2},$$

а также сопротивление

$$cR_2' = R_K - R_1.$$

При построении круговой диаграммы (рис. 3.44) масштаб тока C_i (А/мм) выбирают таким, чтобы диаметр круга $OD = U/C_i x_K$, откладываемый под углом 2γ , был равен 200 мм. Масштаб мощности (кВт/мм) $C_P = mUC_i \cdot 10^{-3}$. Строят полуокружность диаметром OD , от точки O откладывают отрезок $OG = 100$ мм и перпендикулярно к OG строят отрезки (мм):

$$GH = 100 \cdot 2R_1 / (x_1 + x_0);$$

$$GF = 100R_1 / x_K;$$

$$GE = 100R_K / x_K.$$

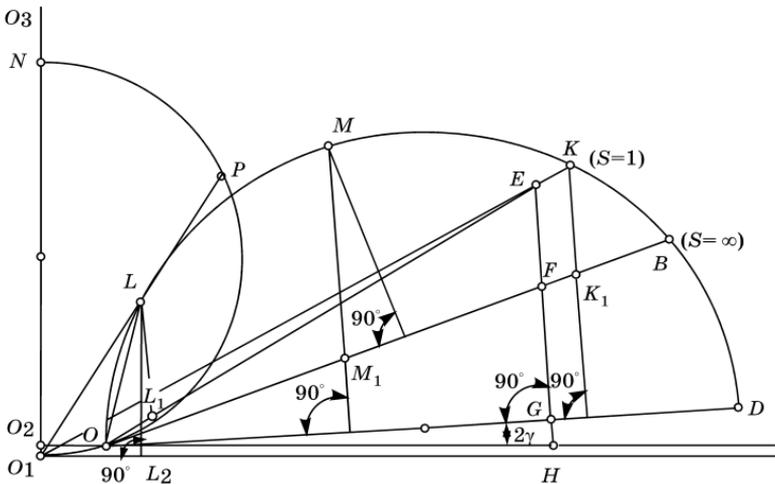


Рис. 3.44

Круговая диаграмма токов (без учета изменения параметров)

Проводят из точки O прямые через точку E до пересечения с окружностью в точке K , которая соответствует скольжению $s = 1$, и через точку F до пересечения с окружностью в точке B , которая соответствует скольжению $s = \infty$.

Прямая OK — линия механических мощностей P'_2 , развиваемых ротором, прямая OB — линия электромагнитной мощности $P_{эм}$ и электромагнитного момента M .

Проводят прямую через O и H и откладывают на ней отрезок OO_2 , равный намагничивающему току I_{μ} .

На продолжении перпендикуляра O_2O_3 к линии O_2H откладывают отрезок O_2O_1 , равный активной составляющей идеального тока холостого хода $I_{ооа}$.

Откладывают на прямой O_1O_3 отрезок O_1N , равный 100 мм, и строят на нем полуокружность радиусом 50 мм.

Откладывают отрезок O_1L , соответствующий номинальному расчетному току статора $I_{1н}$. Отрезок OL определяет ток ротора I_2'' .

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_n = O_1P/100$, где отрезок O_1P в мм.

Мощность P_1 представлена длиной перпендикуляра LL_2 из точки L на ось абсцисс.

Перпендикулярный к диаметру OD отрезок LL_1 соответствует механической мощности P'_2 .

Номинальная мощность $P_{2н} = P'_2 - P_d - P_m$ и КПД двигателя $\eta_n = P_{2н}/P_1$. Потери в обмотке ротора $P_{эл2} = m(I_2'')^2 c^2 R_2'$ и номинальное скольжение $s_n = P_{эл2}/(P'_2 + P_{эл2})$.

Аналогичные расчеты проводят для мощностей $0,25P_{2н}$, $0,5P_{2н}$, $0,75P_{2н}$, $1,25P_{2н}$ и строят рабочие характеристики двигателя.

Если из середины отрезка OB восстановить к нему перпендикуляр до пересечения с окружностью в точке M и опустить из этой точки перпендикуляр к OD до пересечения с линией OB в точке M_1 , то отрезок MM_1 — максимальный момент M_m в масштабе мощности.

При опускании перпендикуляра к линии OD из точки K до пересечения с линией OB в точке K_1 отрезок KK_1 представляет пусковой момент двигателя M_n .

Отрезок O_1K линии, проведенной через точки O_1 и K , в масштабе тока соответствует пусковому току двигателя $I_{1н}$.

Пусковой ток и пусковой момент отличаются от действительных значений, поскольку данный вид диаграммы при построении не учитывает изменение параметров схемы замещения при пуске.

3.9. ДЕЙСТВИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ПУСК ДВИГАТЕЛЯ

Действие высших гармоник на пуск двигателя оценивают на основе схемы замещения (рис. 3.45) с приведением к ротору сопротивления взаимной индукции и тока статора:

$$x'_{\mu v} = 2\pi f \frac{Z_2 D l k_{062v}^2}{k_8 \delta k_{\mu} v^2} \cdot 10^{-7};$$

$$I'_{1v} = I_1 k_{iv},$$

где $k_{iv} = 2\pi m v k_{06v} / (Z_2 k_{062v})$ — коэффициент приведения тока.

Для v -й гармоники:

$$\underline{I}'_{\mu v} = \underline{I}'_{1v} + \underline{I}'_{2v};$$

$$(R_{2v} + j s_v x_{2v}) \underline{I}_{2v} + j s_v x'_{\mu v} \underline{I}'_{\mu v} = 0;$$

$$I_{2v} = \frac{k_{iv} x'_{\mu v} s_v}{\sqrt{R_{2v}^2 + s_v^2 (x'_{\mu v} + x_{2v})^2}} I_1.$$

Электромагнитный момент от гармоники v :

$$M_v = \frac{Z_2 R_{2v} v (k_{iv} x'_{\mu v})^2 s_v}{\omega R_{2v}^2 + \omega s_v^2 (x'_{\mu v} + x_{2v})^2} I_1^2.$$

Электромагнитный момент от основной гармоники:

$$M = \frac{Z_2 R_2 p (k_i x'_{\mu})^2 s}{\omega R_2^2 + \omega s^2 (x' + x_2)^2} I_1^2,$$

где приведенное к ротору сопротивление взаимной индукции для основной гармоники

$$x'_{\mu} = 2\pi f \frac{Z_2 D l k_{062}^2}{k_8 \delta k_{\mu} p^2} \cdot 10^{-7}.$$

Относительный момент от гармоники v :

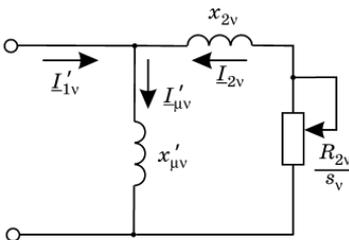


Рис. 3.45

Схема замещения двигателя для гармоники v

$$\begin{aligned}
\frac{M_v}{M} &= \frac{R_{2v} v (k_{iv} x'_{\mu v})^2 s_v}{R_2 p (k_i x'_{\mu v})^2 s} \cdot \frac{R_2^2 + s^2 (x'_\mu + x_2)^2}{R_{2v}^2 + s_v^2 (x'_{\mu v} + x_{2v})^2} = \\
&= \frac{R_{2v}}{R_2} \cdot \frac{v}{p} \cdot \frac{s_v}{s} \cdot \frac{k_{iv}^2}{k_i^2} \cdot \left(\frac{x'_{\mu v}}{x'} \right)^2 \cdot \frac{R_2^2 + s^2 (x'_\mu + x_2)^2}{R_{2v}^2 + s_v^2 (x'_{\mu v} + x_{2v})^2} = \\
&= \frac{R_{2v}}{R_2} \cdot \frac{v}{p} \cdot \frac{s_v}{s} \cdot \frac{k_{iv}^2}{k_i^2} \cdot \left(\frac{k_{o62v}^2 p^2}{\sqrt{2} k_{o62v}^2} \right)^2 \cdot \frac{R_2^2 + s^2 (x'_\mu + x_2)^2}{R_{2v}^2 + s_v^2 (x'_{\mu v} + x_{2v})^2} = \\
&= \frac{R_{2v}}{R_2} \cdot \frac{s_v}{s} \cdot \frac{F_{vm}^2}{F_m^2} \cdot \frac{k_{o62v}^2}{k_{o62}^2} \cdot \frac{p}{v} \cdot \frac{R_2^2 + s^2 (x'_\mu + x_2)^2}{R_{2v}^2 + s_v^2 (x'_{\mu v} + x_{2v})^2}.
\end{aligned}$$

Пример расчета действия выраженных высших гармоник на пуск двигателя АИР112М2. Амплитуды гармоник в долях малых ступенек МДС (см. рис. 3.46):

$$\begin{aligned}
F_{vm} &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} F_x \cos v x dx = \\
&= \frac{4}{\pi v} (\sin v 5^\circ + \sin v 15^\circ + \sin v 25^\circ + \sin v 35^\circ + \sin v 45^\circ + \\
&\quad + \sin v 55^\circ + 2 \sin v 65^\circ + 2 \sin v 75^\circ + 2 \sin v 85^\circ).
\end{aligned}$$

Данные АИР112М2: $D = 0,108$ м и $l = 0,125$ м; $B_\delta = 0,71$ Тл; $k_\mu = 1,75$; $\delta = 0,6$ мм и $k_\delta = 1,2$; $Z/Z_2 = 36/28$; скос пазов ротора $b_{ск} = 9,4$ мм; сечение стержня и сечение замыкающего кольца ротора $Q_c = 93,7$ мм² и $Q_{кл} = 420$ мм²; средний диаметр и высота замыкающего кольца $D_k = 0,078$ м и $h_{кл} = 0,029$ м; длина участка замыкающего кольца $l_{кл} = 0,015$ м; номинальный ток ротора $I_{2н} = 258$ А.

Коэффициент проводимости рассеяния паза ротора (см. рис. 3.47) ($h_1 = 16,05$ мм, $h_2 = 0,4$ мм, $r_1 = 6,4$ мм, $r_2 = 2,7$ мм):

$$\begin{aligned}
\lambda_{п2} &= \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi r_1^2}{2Q_c} \right)^2 + 0,96 + 1,12 \cdot \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2} = \\
&= \frac{16,05 + 0,8 \cdot 1,35}{6 \cdot 3,2} \cdot \left(1 - \frac{3,1416 \cdot 3,2^2}{2 \cdot 93,7} \right)^2 + \\
&\quad + 0,96 + 1,12 \cdot \frac{0,4 \cdot 10^3}{258} = 3,31.
\end{aligned}$$

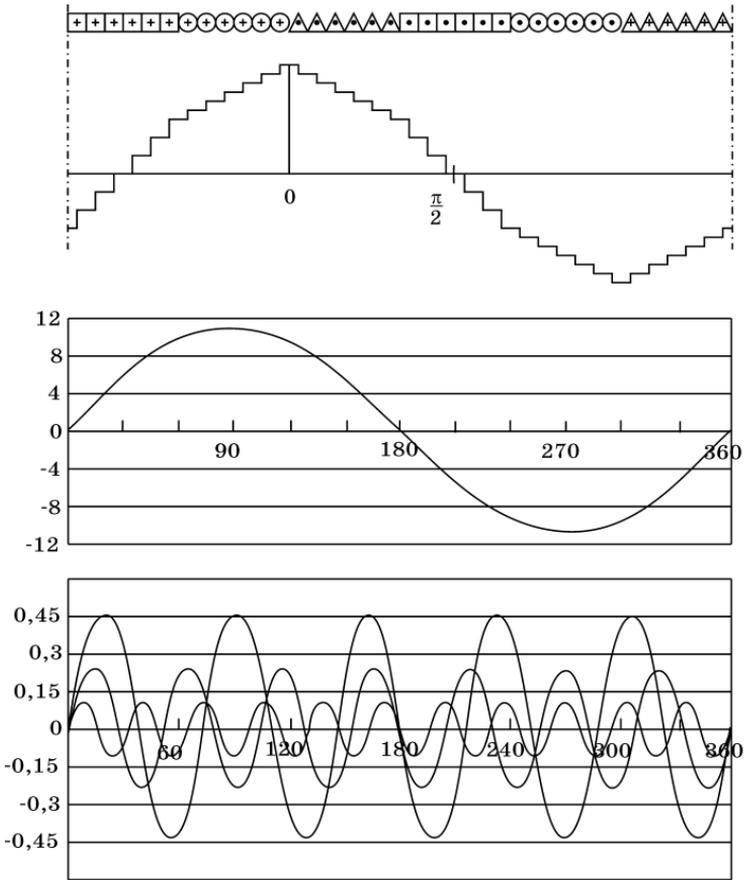


Рис. 3.46

Основная гармоника и первые высшие гармоники МДС

Коэффициент проводимости рассеяния замыкающих колец:

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2,3D_{\text{к}}}{Z_2 l \left(2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2} \lg \frac{4,7D_{\text{к}}}{2h_{\text{кл}} + 2l_{\text{кл}}} =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 0,078}{28 \cdot 0,125 \cdot \left(2 \sin \frac{180 \cdot 1}{28} \right)^2} \lg \frac{4,7 \cdot 0,078}{2 \cdot 0,029 + 2 \cdot 0,015} = 0,64.$$

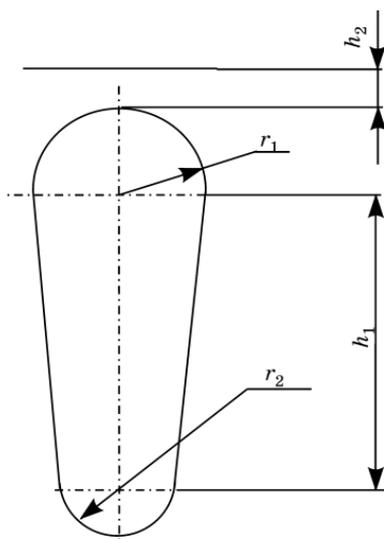


Рис. 3.47
Форма закрытого паза ротора

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д2} = \frac{0,9t_2 \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2}{\delta k_\delta} \cdot \tau_{д2} = \frac{0,9 \cdot 11,983 \cdot \left(\frac{28}{6 \cdot 1} \right)^2}{0,6 \cdot 1,2} \cdot 0,0043 = 1,4,$$

где значение коэффициента дифференциального рассеяния и зубцовое деление ротора:

$$\tau_{д2} = \frac{(\pi p)^2}{\left(Z_2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2} - 1 = \frac{(3,1416 \cdot 1)^2}{\left(28 \sin \frac{180 \cdot 1}{28} \right)^2} - 1 = 0,0043;$$

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{3,1416 \cdot 0,1068}{28} = 0,011983 \text{ м.}$$

Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2 (b_{ск} / t_2)^2}{9,5 \delta k_\delta k_\mu} = \frac{11,983 \cdot (9,4 / 11,983)^2}{9,5 \cdot 0,6 \cdot 1,2 \cdot 1,75} = 0,616.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9fl(\lambda_{п2} + \lambda_{кл} + \lambda_{д2} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,125 \cdot (3,31 + 0,64 + 1,4 + 0,616) \cdot 10^{-6} = \\ &= 2,95 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Активное сопротивление стержня, активное сопротивление замыкающих колец, приведенное к току стержня, и активное сопротивление роторной обмотки:

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{l}{\gamma_a Q_c \cdot 10^3} = \frac{125}{24 \cdot 93,7 \cdot 10^3} = 0,556 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;} \\ R_{кл} &= \frac{2\pi D_k}{Z_2 \gamma_a Q_{кл} \left(2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}\right)^2 \cdot 10^3} = \\ &= \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 78}{28 \cdot 24 \cdot 420 \cdot \left(2 \sin \frac{180^\circ \cdot 1}{28}\right)^2 \cdot 10^3} = 0,347 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;} \\ R_2 &= R_c + R_{кл} = (0,556 + 0,0347) \cdot 10^{-4} \approx 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Скосу пазов ротора на $\beta_{ск} = 360^\circ b_{ск} / \pi D_2 = 360^\circ \cdot 9,4 / (3,1416 \cdot 106,8) = 10,0868^\circ$ соответствует обмоточный коэффициент:

$$k_{об2} = \frac{\sin \frac{p\beta_{ск}}{2}}{\frac{p\beta_{ск}}{2}} = \frac{\sin \frac{1 \cdot 10,0868}{2}}{\frac{1 \cdot 0,176}{2}} = 0,999.$$

Приведенное к ротору сопротивление взаимной индукции:

$$\begin{aligned} x'_\mu &= 2\pi f \frac{Z_2 D l k_{об2}^2}{\delta k_\delta k_\mu p^2} = \\ &= 314 \cdot \frac{28 \cdot 0,108 \cdot 0,125 \cdot 0,999^2}{0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 1,75 \cdot 1^2} \cdot 10^{-7} = 94 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

По тем же формулам для обратнотвращающейся высшей гармоники $\nu = 5$:

- обмоточный коэффициент роторной обмотки:

$$k_{об2\nu} = 0,968;$$

- приведенное к ротору сопротивление взаимоиנדукции:

$$x'_{\mu\nu} = 3,55 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

- коэффициент проводимости рассеяния замыкающих колец:

$$\lambda_{\text{кЛВ}} = 0,028;$$

- коэффициент проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{\text{д2v}} = 1,46.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки ($\lambda_{\text{п2v}} = \lambda_{\text{п2}} = 3,31$ и $\lambda_{\text{сКВ}} = \lambda_{\text{сК}} = 0,616$):

$$\begin{aligned} x_{2v} &= 7,9f(\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{кЛВ}} + \lambda_{\text{д2v}} + \lambda_{\text{сК}}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,125 \cdot (3,31 + 0,028 + 1,46 + 0,616) \cdot 10^{-6} = \\ &= 2,68 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Активное сопротивление элементов замыкающих колец, приведенное к току стержня, и активное сопротивление обмотки ротора ($R_{\text{св}} = R_{\text{с}} = 0,556 \cdot 10^{-4}$ Ом):

$$R_{\text{кЛВ}} = 0,0155 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$R_{2v} = R_{\text{с}} + R_{\text{кЛВ}} = (0,556 + 0,0155) \cdot 10^{-4} \approx 0,571 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Скольжение ротора и относительный момент от гармоники $v = 5$ (см. рис. 3.48):

$$\begin{aligned} s_v &= 1 + (1-s) \frac{v}{p} = 1 + (1-s) \frac{5}{1} = 6 - 5s; \\ \frac{M_v}{M} &= \frac{k_{\text{об2v}}^2}{k_{\text{об2}}^2} \cdot \frac{p}{v} \cdot \frac{F_{mv}^2}{F_m^2} \cdot \frac{R_{2v}}{R_2} \cdot \frac{s_v}{s} \cdot \frac{R_2^2 + s^2(x'_\mu + x_2)^2}{R_{2v}^2 + s_v^2(x'_{\mu\nu} + x_{2v})^2} = \\ &= \frac{0,968^2}{0,999^2} \cdot \frac{1}{5} \cdot 0,0412^2 \cdot \frac{0,571}{0,90} \cdot \frac{s_v}{s} \times \\ &\times \frac{0,90^2 \cdot 10^{-8} + s^2(94 \cdot 10^{-4} + 2,95 \cdot 10^{-4})^2}{0,571^2 \cdot 10^{-8} + s_v^2(3,55 \cdot 10^{-4} + 2,68 \cdot 10^{-4})^2} = \\ &= 2,025 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(6-5s) \cdot (0,81 + s^2 \cdot 9400)}{s \cdot (0,326 + (6-5s)^2 \cdot 38,81)}. \end{aligned}$$

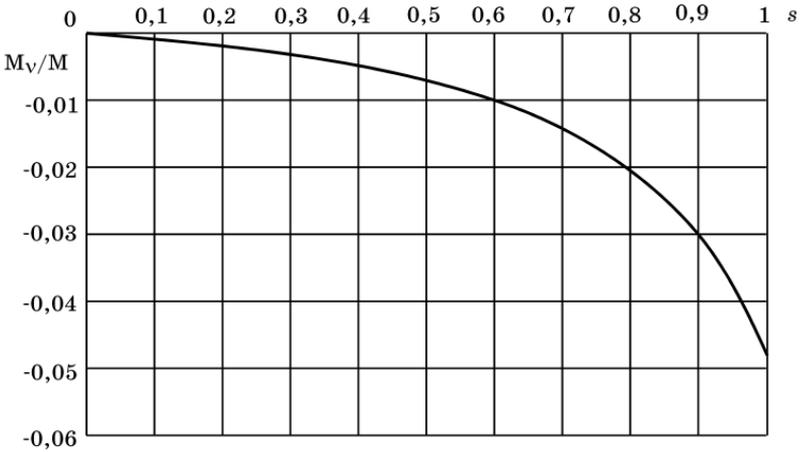


Рис. 3.48
Вид относительного момента от гармоники $\nu = 5$

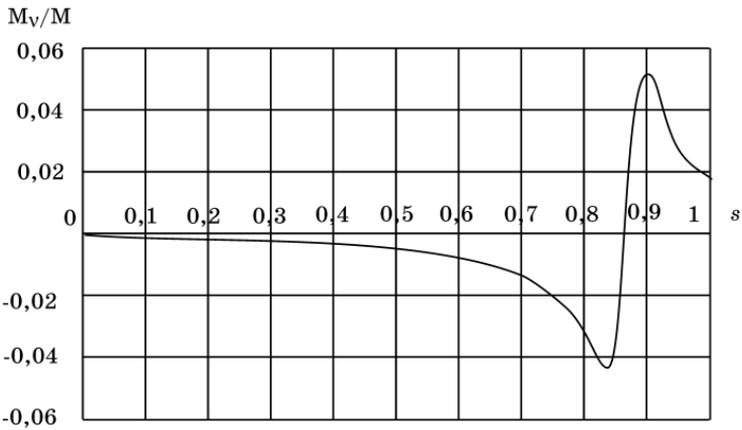


Рис. 3.49
Вид относительных моментов от гармоники $\nu = 7$

Для прямовращающейся высшей гармоники $\nu = 7$:

$$\begin{aligned}
 k_{об2\nu} &= 0,938; \quad x'_{\mu\nu} = 1,69 \text{ Ом}; \\
 \lambda_{\kappaЛ\nu} &= 0,0227; \quad \lambda_{д2\nu} = 1,56; \\
 x_{2\nu} &= 2,72 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \quad R_{\kappaЛ\nu} = 0,00435 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \\
 R_{2\nu} &= 0,56 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

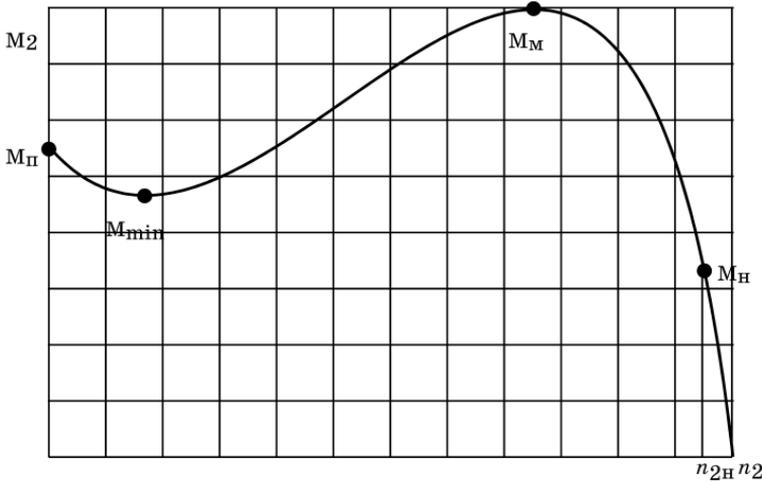


Рис. 3.50
Вид характерных величин моментов двигателя

Скольжение ротора и относительный момент от гармоники $\nu = 7$ (рис. 3.49):

$$\begin{aligned}
 s_{\text{впр}} &= 1 - (1 - s) \frac{\nu}{p} = 1 - (1 - s) \frac{7}{1} = 7s - 6; \\
 \frac{M_{\nu}}{M} &= \frac{k_{\text{об}2\nu}^2}{k_{\text{об}2}^2} \cdot \frac{p}{\nu} \cdot \frac{F_{m\nu}^2}{F_m^2} \cdot \frac{R_{2\nu}}{R_2} \cdot \frac{s_{\nu}}{s} \cdot \frac{R_2^2 + s^2(x'_{\mu} + x_2)^2}{R_{2\nu}^2 + s_{\nu}^2(x'_{\mu\nu} + x_{2\nu})^2} = \\
 &= \frac{0,938^2}{0,999^2} \cdot \frac{1}{7} \cdot 0,022^2 \cdot \frac{0,56}{0,90} \cdot \frac{s_{\nu}}{s} \times \\
 &\times \frac{0,90^2 \cdot 10^{-8} + s^2(94 \cdot 10^{-4} + 2,95 \cdot 10^{-4})^2}{0,56^2 \cdot 10^{-8} + s_{\nu}^2 \cdot (1,69 \cdot 10^{-4} + 2,72 \cdot 10^{-4})^2} = \\
 &= 0,38 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(7s - 6) \cdot (0,81 + s^2 \cdot 9400)}{s \cdot (0,314 + (7s - 6)^2 \cdot 19,45)}.
 \end{aligned}$$

При пуске двигателя и достижении ротором частоты вращения $n_2 = 3000/7$ об/мин моменты от высших гармоник создают определенной величины «провал» в моменте двигателя.

В паспортных данных некоторых двигателей указывают и кратность минимального момента $k_{\text{мин}} = M_{\text{мин}}/M_{\text{н}}$ (рис. 3.50).

3.10. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Частоту вращения асинхронного двигателя $n_2 = 60f(1 - s)/p$ можно регулировать переключением пар полюсов статорной обмотки, скольжением ротора и изменением частоты тока.

В двигателях с переключением пар полюсов — многоскоростных двигателях чаще применяют полюсопереключаемые статорные обмотки. Примеры схем показаны на рисунках 3.51–3.56.

К достоинству многоскоростных двигателей можно отнести то, что при изменении нагрузки они работают на каждой ступени при незначительном изменении частоты вращения.

При соединении фаз Δ/YY , например, двигателя на 4/2 полюса ($k_{\text{об}4}/k_{\text{об}2} = 0,831/0,676$ и $k_{E4}/k_{E2} \approx 0,98$), включаемого в сеть 380 В, соотношение витков, потоков и индукций в воздушном зазоре:

$$\frac{w_4}{w_2} = \frac{k_{E4}U_{\text{н}4}k_{\text{об}2}\Phi_2}{k_{E2}U_{\text{н}2}k_{\text{об}4}\Phi_4} = 0,98 \cdot \frac{380 \cdot 0,676 \cdot \Phi_2}{220 \cdot 0,831 \cdot \Phi_4} = 2;$$

$$\frac{\Phi_4}{\Phi_2} = 0,69;$$

$$\frac{B_{\delta 4}}{B_{\delta 2}} = \frac{2\Phi_4}{\Phi_2} = 2 \cdot 0,69 = 1,38.$$

По соотношению индукций базой для многоскоростного двигателя служит габарит четырехполюсного двигателя.

При соединении фаз Y/YY :

$$\frac{w_4}{w_2} = \frac{k_{E4}U_{\text{н}4}k_{\text{об}2}\Phi_2}{k_{E2}U_{\text{н}2}k_{\text{об}4}\Phi_4} = 0,98 \cdot \frac{220 \cdot 0,676 \cdot \Phi_2}{220 \cdot 0,831 \cdot \Phi_4} = 2;$$

$$\frac{\Phi_4}{\Phi_2} = 0,40;$$

$$\frac{B_{\delta 4}}{B_{\delta 2}} = \frac{2\Phi_4}{\Phi_2} = 2 \cdot 0,40 = 0,80.$$

Здесь за базу принимают габарит двухполюсного двигателя.

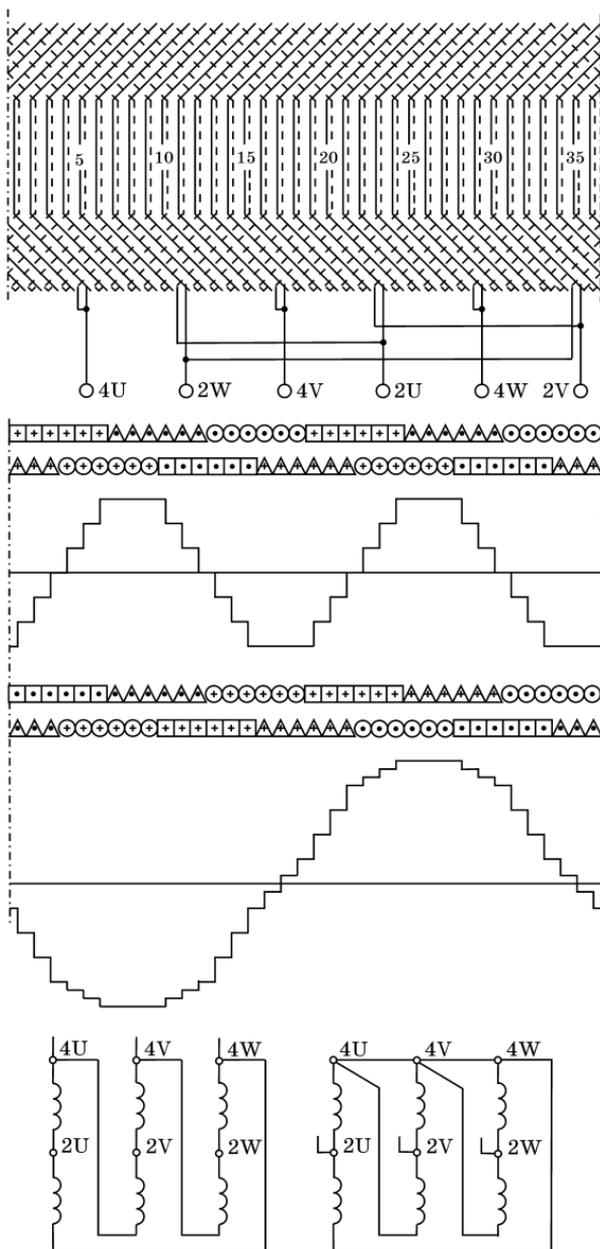


Рис. 3.51
 Схема и МДС обмотки на 4/2 полюса, Δ/УУ

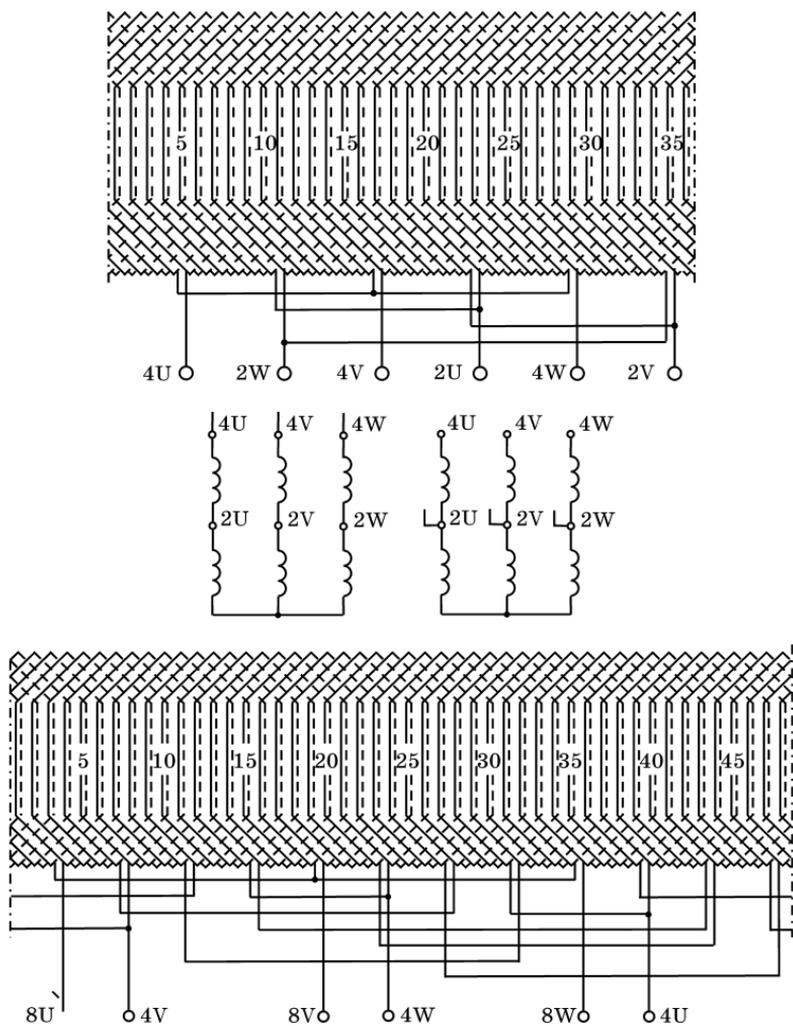


Рис. 3.52
Схемы обмотки на $4/2$ полюса, Y/Y

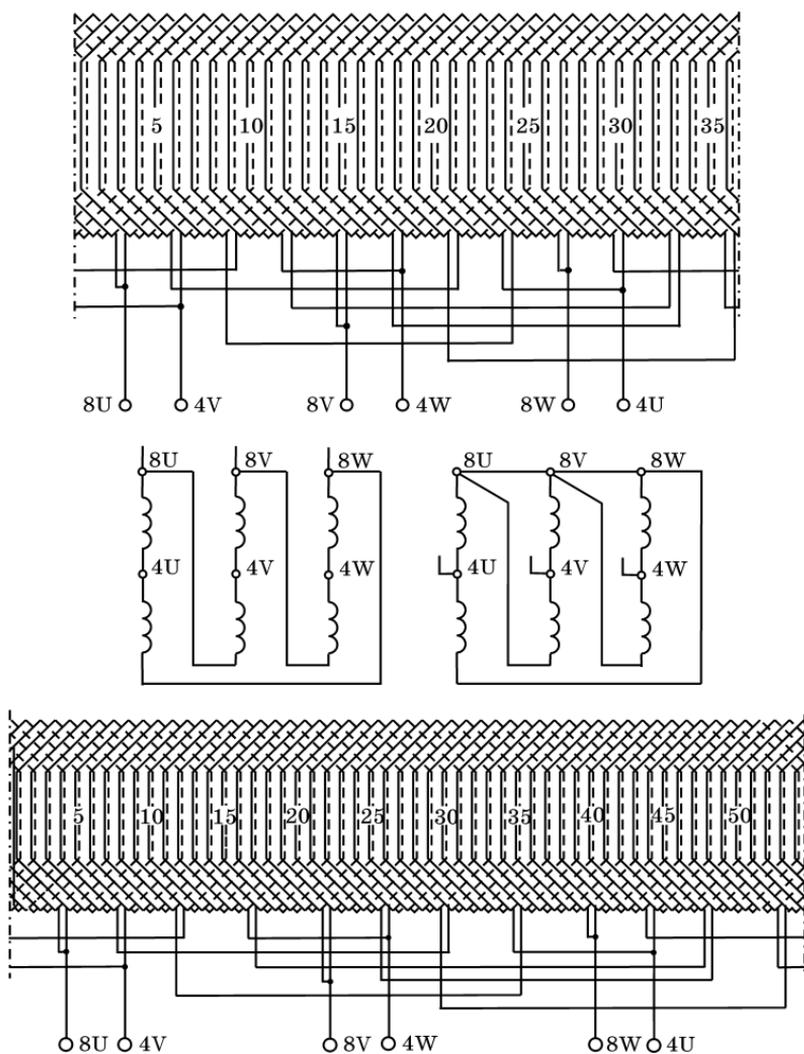


Рис. 3.53
Схемы обмоток на 8/4 полюса, Δ/YY

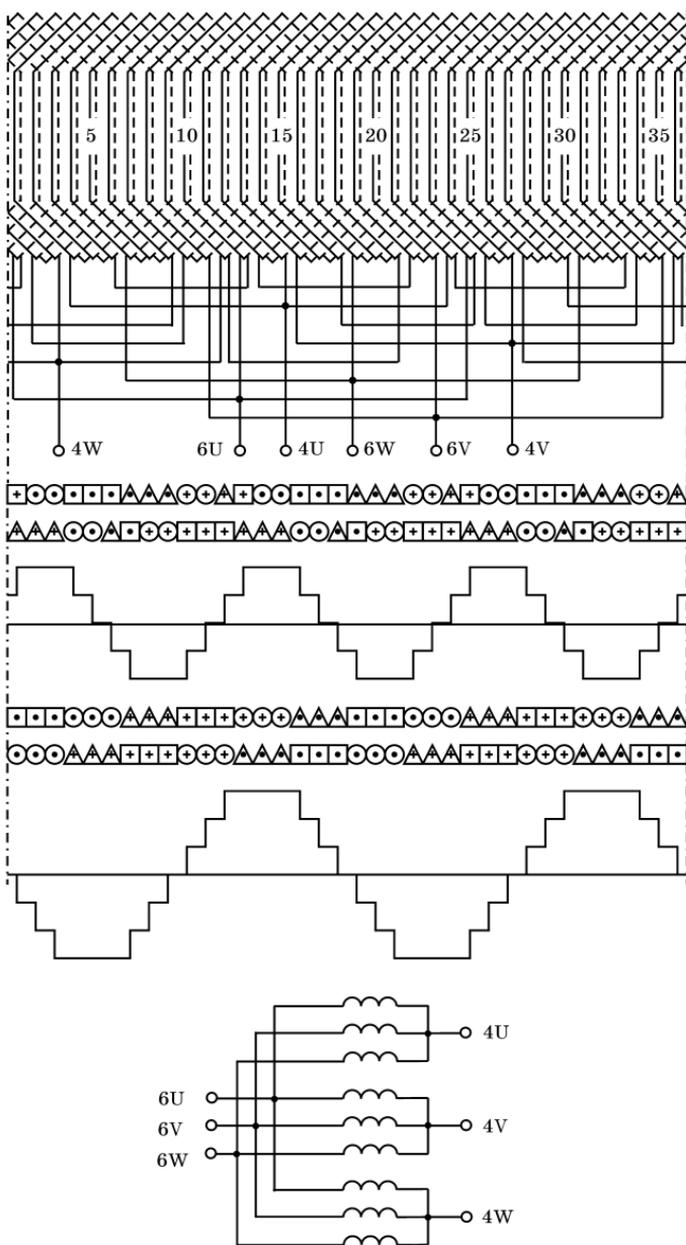


Рис. 3.54
Схемы обмоток на 6/4 полюса, Y/YU

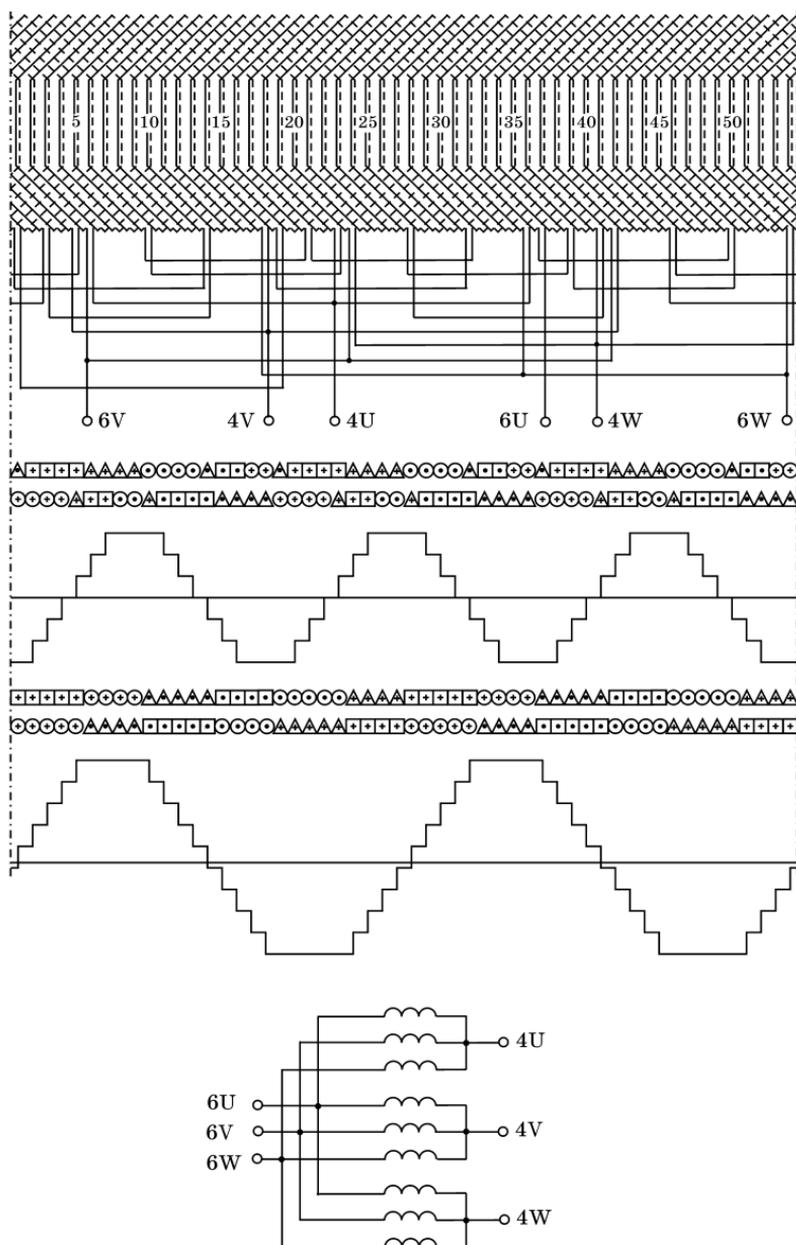


Рис. 3.55
 Схема и МДС обмотки на 6/4 полюса, YYY/YYY

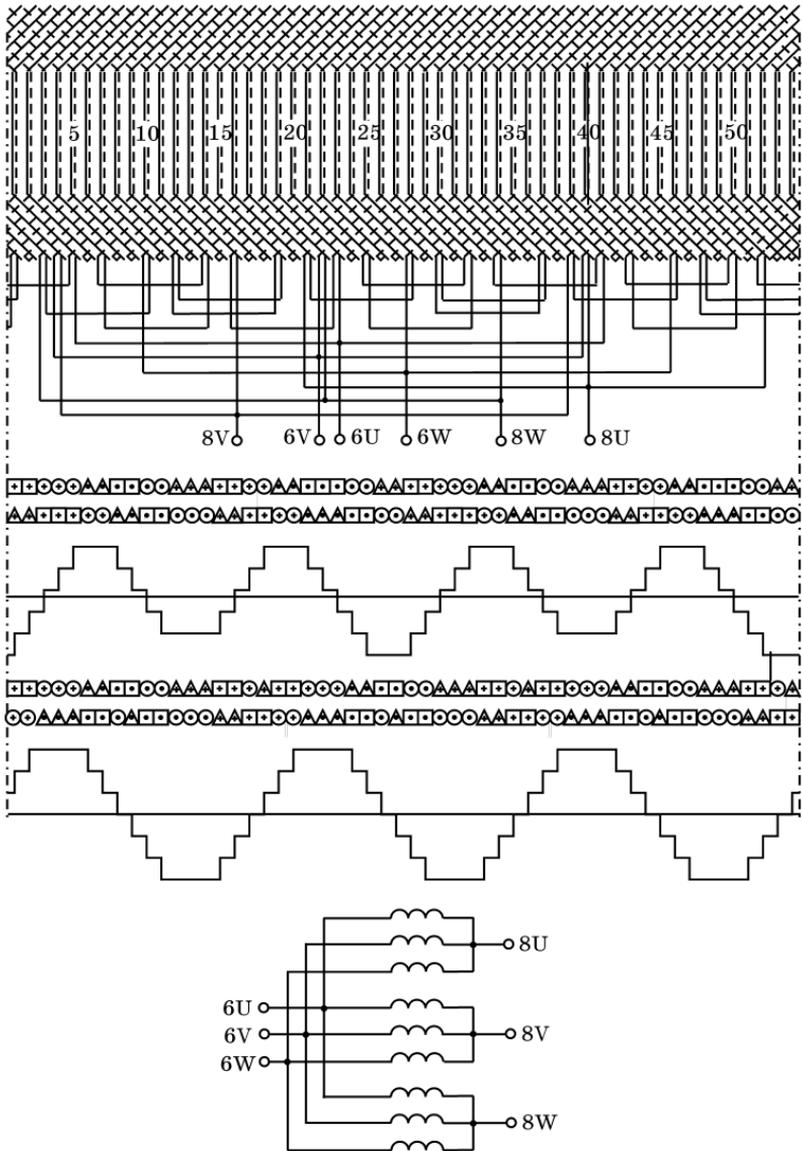


Рис. 3.56

Схема и МДС обмотки на 8/6 полюсов, YYY/YYY

Таблица 3.6

Обмоточные данные многоскоростных двигателей, $\Delta/Y/Y$

Типоразмер двигателя	$P_{2\Omega}$, кВт	w_k	d , мм
АИР71А4/2	0,48/0,62	89	0,355
АИР71В4/2	0,71/0,85	71	0,40
АИР80А4/2	1,1/1,5	53	0,50
АИР80В4/2	1,5/2,0	42	0,56
АИР90Л4/2	2,2/2,7	34	0,63
АИР100S4/2	3,0/3,75	34	0,85
АИР100Л4/2	4,25/4,75	28	0,95
АИР112М4/2	4,2/5,3	27	1,0
АИР132S4/2	6,0/7,0	25	1,12
АИР132М4/2	8,5/9,5	19	1,25
АИР90Л8/4	0,8/1,32	61	0,50
АИР100S8/4	1,0/1,7	63	0,56
АИР100Л8/4	1,4/2,36	50	0,67
АИР112М8/4	1,9/3,0	40	0,71
АИР112МВ8/4	2,2/3,6	32	0,80
АИР132S8/4	3,6/5,3	29	0,90
АИР132М8/4	5,0/7,5	22	1,06

Данные некоторых двигателей со схемами Даландера приведены в таблице 3.6.

Если при переключении полюсов недопустим разрыв в цепи питания двигателя (например, в приводе лифтов, подъемных кранов), в пазы статора укладывают две обмотки. При переключениях на определенное время в сеть включены обе обмотки, одна из которых (с большим числом полюсов) создает тормозной момент.

При регулировании частоты вращения скольжением, например, понижением подводимого напряжения к двигателю малой мощности, с ростом скольжения возрастают электрические потери. Этот метод применяют, например, в приводе осевых вентиляторов ВО-7 с приводом от двигателей АИРП80А6 (П — для птичников) систем вентиляции корпусов птицеферм (см. рис. 3.57).

Регулирование частоты вращения скольжением больше встречается у двигателей с фазным ротором, которые

находят применение в приводах кранов. В таких приводах двигатель должен развивать при пуске большой момент, что достигается с помощью добавочных активных сопротивлений в цепи ротора (рис. 3.58). Добавочные сопротивления

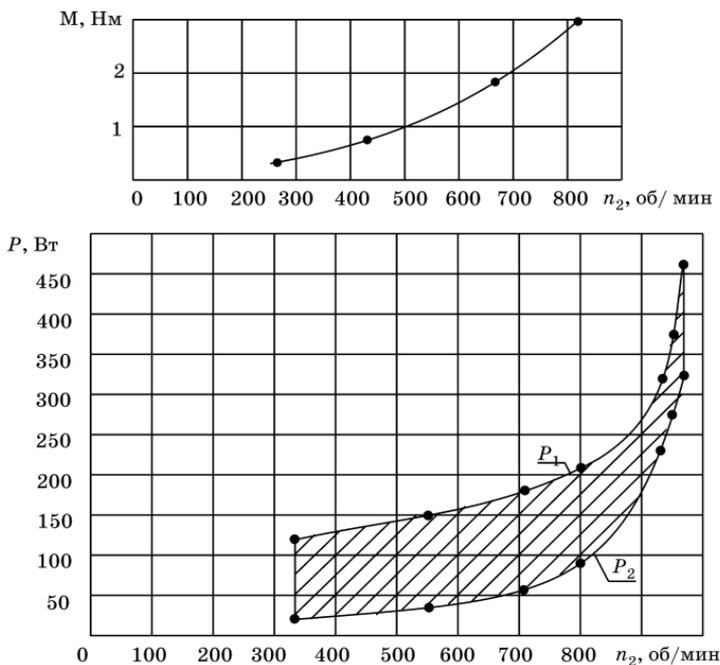


Рис. 3.57

Механическая характеристика вентилятора, потери в двигателе

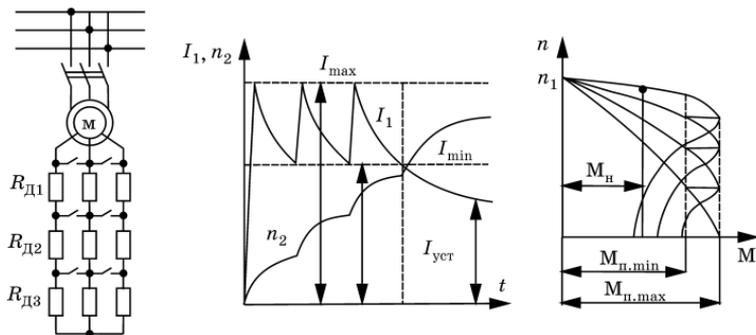


Рис. 3.58

Реостатный способ регулирования частоты вращения двигателя

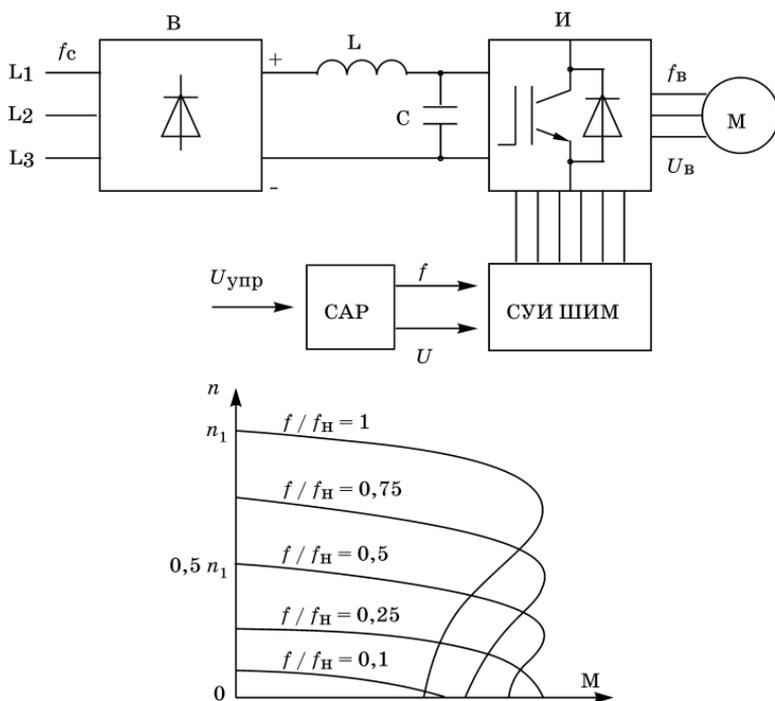


Рис. 3.59

Структурная схема преобразователя частоты, механические характеристики двигателя при определенном законе управления преобразователем

способствуют и снижению пускового тока. С ростом скольжения возрастают электрические потери в цепи роторной обмотки с добавочными сопротивлениями, что снижает энергетические показатели привода.

При частотном регулировании применяют преобразователи частоты, составными элементами которых являются выпрямитель В, фильтр из дросселя LC , инвертор И (рис. 3.59). Регулирование частоты f_B и напряжения U_B осуществляется в инверторе методом широтно-импульсного управления (СУИ ШИМ). Длительность подключения каждой фазной обмотки в пределах периода следования импульсов модулируется по синусоидальному закону. Система САР устанавливает определенное соотношение напряжения и частоты.

3.11. РАБОТА ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Несимметричную систему напряжений питающей сети можно представить в виде суммы симметричных составляющих прямой и обратной последовательности ($a = e^{j2\pi/3}$):

$$\underline{U}_{11} = (\underline{U}_U + a\underline{U}_V + a^2\underline{U}_W) / 3;$$

$$\underline{U}_{12} = (\underline{U}_U + a^2\underline{U}_V + a\underline{U}_W) / 3$$

и схемами замещения двигателя (рис. 3.60).

Токи ротора и моменты двигателя:

$$I'_{21} = \frac{U_{11}}{\sqrt{\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}};$$

$$I'_{22} = \frac{U_{12}}{\sqrt{\left(R_1 + c \frac{R'_2}{2-s}\right)^2 + x_K^2}}.$$

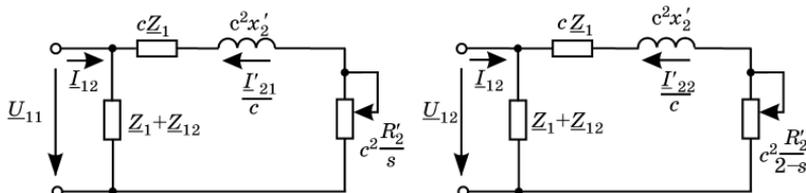


Рис. 3.60

Схемы замещения двигателя
для напряжений прямой и обратной последовательности

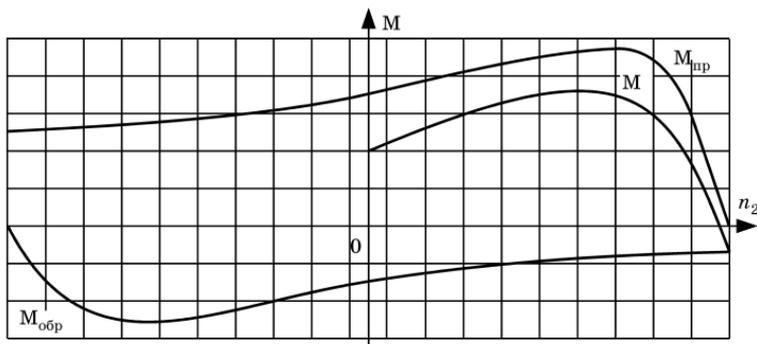


Рис. 3.61

Моменты двигателя

$$M_{\text{пр}} = \frac{mU_{11}^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_1 \left[\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_{\text{к}}^2 \right]};$$

$$M_{\text{обр}} = \frac{mU_{12}^2 \frac{R'_2}{2-s}}{\omega_1 \left[\left(R_1 + c \frac{R'_2}{2-s} \right)^2 + x_{\text{к}}^2 \right]}.$$

Вращение двигателя осуществляет результирующий момент $M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$ (рис. 3.61).

При работе с малым скольжением s в знаменателе для напряжения U_{11} преобладает $(R'_2/s)^2$. Для напряжения U_{12} $(R_1 + R'_2/(2-s))^2 \ll x_{\text{к}}^2$. Поэтому при $2-s \approx 2$:

$$\frac{M_{\text{обр}}}{M_{\text{пр}}} \approx \frac{U_{12}^2}{U_{11}^2} \frac{cR'_2}{2s} \left(\frac{1}{x_{\text{к}}} \right).$$

Соотношение $cR'_2/x_{\text{к}} = s_{\text{к}}$ определяет критическое скольжение, следовательно, для малых скольжений

$$\frac{M_{\text{обр}}}{M_{\text{пр}}} = \frac{U_{12}^2 s_{\text{к}}^2}{U_{11}^2 2s}.$$

Потери электрические в роторе:

$$P_{\text{эл21}} = P_{\text{эм. пр}} s = M_{\text{пр}} \omega_1 s;$$

$$P_{\text{эл22}} = P_{\text{эм. обр}} (2-s) = M_{\text{обр}} \omega_1 (2-s).$$

При малых скольжениях

$$\frac{P_{\text{эл22}}}{P_{\text{эл21}}} = \frac{P_{\text{эл. обр}} (2-s)}{P_{\text{эл. пр}} s} = \frac{M_{\text{обр}} (2-s)}{M_{\text{пр}} s} \approx \frac{2M_{\text{обр}}}{M_{\text{пр}} s} = \frac{U_{12}^2 s_{\text{к}}^2}{U_{11}^2 s^2}.$$

Например, при $U_{12}/U_{11} = 0,15$ для двигателя АИР90Л4, у которого $s_{\text{к}} = 0,33$, $s_{\text{н}} = 0,07$:

$$\frac{M_{\text{обр}}}{M_{\text{пр}}} = 0,15^2 \cdot \frac{0,33^2}{2 \cdot 0,07} = 0,018;$$

$$\frac{P_{\text{эл22}}}{P_{\text{эл21}}} = 0,15^2 \cdot \left(\frac{0,33}{2 \cdot 0,07} \right)^2 = 0,5.$$

Таким образом, даже при значительной асимметрии напряжения в сети тормозной момент от обратной последовательности весьма мал, однако потери в обмотке ротора сильно возрастают. Согласно нормам асимметрия напряжений в сети не должна превышать 2%.

3.12. РАБОТА ПРИ НЕСИММЕТРИИ В ЦЕПИ РОТОРА

Несимметричные токи в цепи ротора возникают из-за дефектов литья клетки короткозамкнутой обмотки, вследствие нарушения контакта в месте присоединения стержней к контактными кольцам, или неодинакового нажатия щеток на кольца двигателя с фазным ротором.

Ток ротора прямой последовательности I_{21} создает МДС F_{21} , имеющую относительно ротора частоту вращения n_{1s} или частоту вращения n_1 относительно статора. МДС F_{21} совместно с неподвижной относительно нее МДС статорной обмотки F_1 образует результирующую МДС прямой последовательности с амплитудой F_{om} . Поток Φ , создаваемый результирующей МДС, взаимодействуя с током ротора I_{21} , образует прямовращающий момент двигателя M_1 .

Ток ротора обратной последовательности I_{22} создает МДС F_{22} , с частотой вращения n_1s в сторону, обратную движению ротора, или с частотой вращения $n_3 = n_1(1-s) - n_1s = n_1(1-2s)$ относительно неподвижного статора. Вращающееся магнитное поле, созданное МДС F_{22} , наведет в обмотке статора ток I_{13} частоты $f_3 = f_1(1-2s)$, замыкающийся через сеть и налагающийся на ток статора частоты f_1 . Так как в первичной сети нет напряжений частоты f_3 и сопротивление сети по сравнению с сопротивлением обмотки двигателя мало, то можно считать, что обмотка статора по отношению к токам I_{13} является короткозамкнутой.

МДС F_{22} , созданная током обратной последовательности ротора I_{22} , и МДС F_{13} , созданная током статора I_{13} , слагаясь в результирующую МДС, создают вращающееся магнитное поле Φ' , взаимодействие которого с током статора I_{13} образует момент M_2 .

При скольжениях ротора $0 < s < 0,5$ $n_3 < 0$. Это означает, что поле Φ' вращается против движения ротора и,

взаимодействуя с током статора I_{13} , создаст момент M_2 , стремящийся увлечь статор в сторону движения поля Φ' . Но статор неподвижен, и реакция передается на ротор в обратном направлении, т. е. в направлении его вращения. В этом случае момент M_2 действует согласно с моментом M_1 . Результирующий момент на валу двигателя $M = M_1 + M_2$.

При скольжениях $0 < s < 0,5$, $n_3 > 0$ и поле Φ' вращается в сторону движения ротора. Момент M_2 , действующий на ротор, согласно приведенному выше объяснению будет тормозящим. Результирующий момент на валу $M = M_1 - M_2$. На рисунке 3.62 показана примерная зависимость моментов от скольжения. В результирующем моменте M явно выражен провал непосредственно за полусинхронной частотой вращения ротора.

Наиболее сильно действие тока ротора обратной последовательности I_{22} проявляется при обрыве фазы трехфазного ротора (у двигателя с фазным ротором). Из-за отсутствия реакции со стороны статора при $s = 0,5$ ($I_{13} = 0,5$) токи ротора I_{22} совпадают с намагничивающим током I_{220} , необходимым только для образования поля Φ , и являются минимальными. Но при обрыве одной из фаз токи прямой и обратной последовательности равны $I_{21} = I_{22}$, следовательно, при скольжении $s = 0,5$ ток ротора прямой последовательности I_{21} также будет иметь минимальное значение. Отмеченные уменьшения токов I_{21} и I_{22} приводят к соответствующим уменьшениям моментов M_1 и M_2 и результирующего момента M (рис. 3.63). Во время разбега двигателя с оборванной фазной обмоткой ротора он «застревает» после

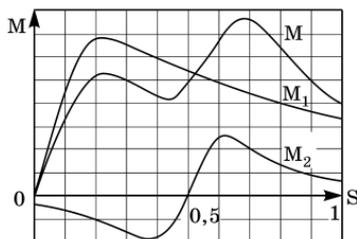


Рис. 3.62

Моменты двигателя при асимметрии в цепи ротора

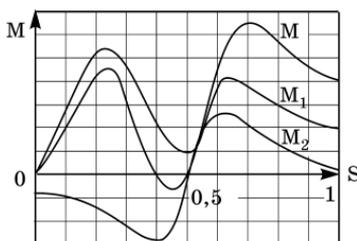


Рис. 3.63

Моменты двигателя при обрыве фазы трехфазного ротора

достижения полусинхронной частоты вращения, что недопустимо с позиций требуемого режима работы приводимой машины.

Искажение механической характеристики при обрыве фазной обмотки ротора впервые было описано Гёргесом, а само явление получило название *явления Гёргеса*, или *эффекта одноосного включения*.

3.13. ТРЕХФАЗНО-ДУХФАЗНЫЕ И ОДНОФАЗНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Рисунок 3.64 иллюстрирует переход от трехфазной к двухфазной обмотке.

Токи двухфазных обмоток будут симметричными только при определенной нагрузке на валу двигателя. В этом режиме нагрузки токи образуют круговую вращающуюся МДС

$$F_1 = \frac{2\sqrt{2}I_1 w k_{об}}{\pi p} \left[\left(\sin \omega t \cos px + \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \cos \left(px - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right] = F_{1m} \sin(\omega t - px).$$

Балансу реактивной мощности двигателя $2U_H I_{1H} \sin 45^\circ$ и конденсатора $U_c^2 \omega C$ отвечает емкость конденсатора

$$C = \frac{I_{1H}}{\omega U_H} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 10^6 = \frac{I_{1H}}{314 U_H} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 10^6 \approx 2250 \frac{I_{1H}}{U_H} \text{ мкФ}.$$

При переключении полюсов обмотки соотношение витков, потоков и индукций в воздушном зазоре ($k_{E6}/k_{E4} \approx 0,98$):

$$\frac{w_6}{w_4} = \frac{k_{E6} U_{H6} k_{об4} \Phi_4}{k_{E4} U_{H4} k_{об6} \Phi_6} = 0,98 \cdot \frac{220 \cdot 0,94 \cdot \Phi_4}{220 \cdot 0,79 \cdot \Phi_6} = 2;$$

$$\frac{\Phi_6}{\Phi_4} = 0,59;$$

$$\frac{B_{\delta 6}}{B_{\delta 4}} = \frac{6}{4} \cdot \frac{\Phi_6}{\Phi_4} = 1,5 \cdot \frac{\Phi_6}{\Phi_4} = 1,5 \cdot 0,59 = 0,88.$$

Двигатель подходит для привода вентилятора. При $2p = 6$ он практически не потребляет из сети реактивную мощность.

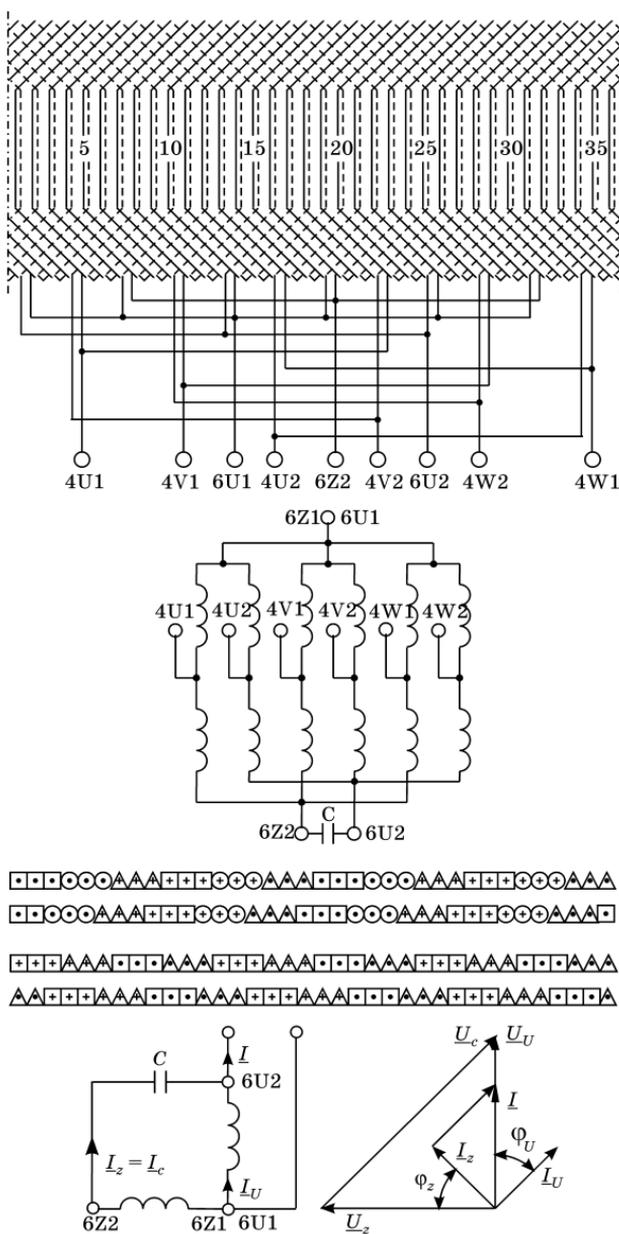


Рис. 3.64
 Схема обмотки на 6/4 полюса, схема токов и векторная диаграмма токов в уравновешенном режиме при $2p = 6$

Расчет трехфазно-двухфазной обмотки на габарите двигателя АИР100L4 ($w = 174$; $k_{о6} = 0,96$; $D = 104$ мм).

Ориентируясь на данные АИР100L4, определяем число витков на фазу:

$$w_4 = wk_{о6}/k_{о64} = 174 \cdot 0,96/0,94 \approx 180.$$

В катушке 45 витков. В пазу $N = 90$ проводников диаметром

$$d_{из} = \sqrt{Q/N} = \sqrt{57/90} = 0,796 \text{ мм.}$$

Выбираем $d/d_{из} = 0,71/0,77$ мм.

Номинальный ток при $2p = 6$ (линейная нагрузка $A_6 = 235$ А/см), емкость конденсатора, напряжение на конденсаторе и его рабочее напряжение:

$$I_{1нб} = \frac{\pi D A_6}{2m w_6} = \frac{3,14 \cdot 10,4 \cdot 235}{2 \cdot 2 \cdot 360} = 5,33 \text{ А;}$$

$$C \approx 2250 I_{1нб} / U_H = 2250 \cdot 5,33 / 220 = 55 \text{ мкФ;}$$

$$U_c = 1,414 \cdot 220 = 311 \text{ В;}$$

$$U_{cp} \geq 1,414 U_c \geq 1,414 \cdot 311 \geq 440 \text{ В.}$$

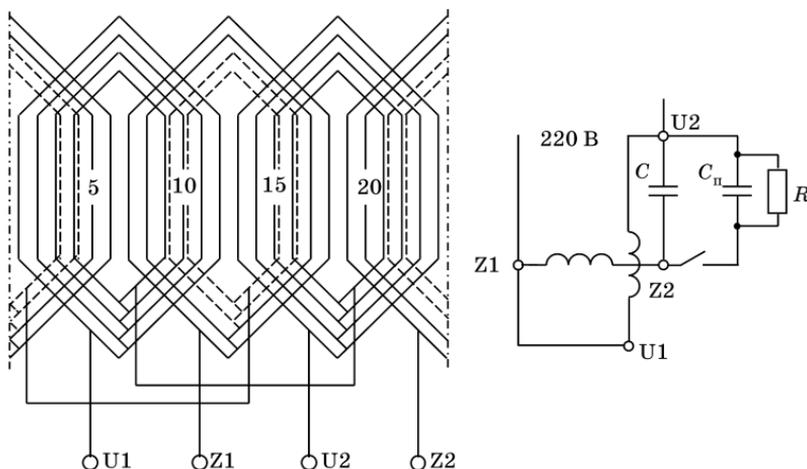


Рис. 3.65

Схема двухполюсной обмотки и схема включения конденсаторов

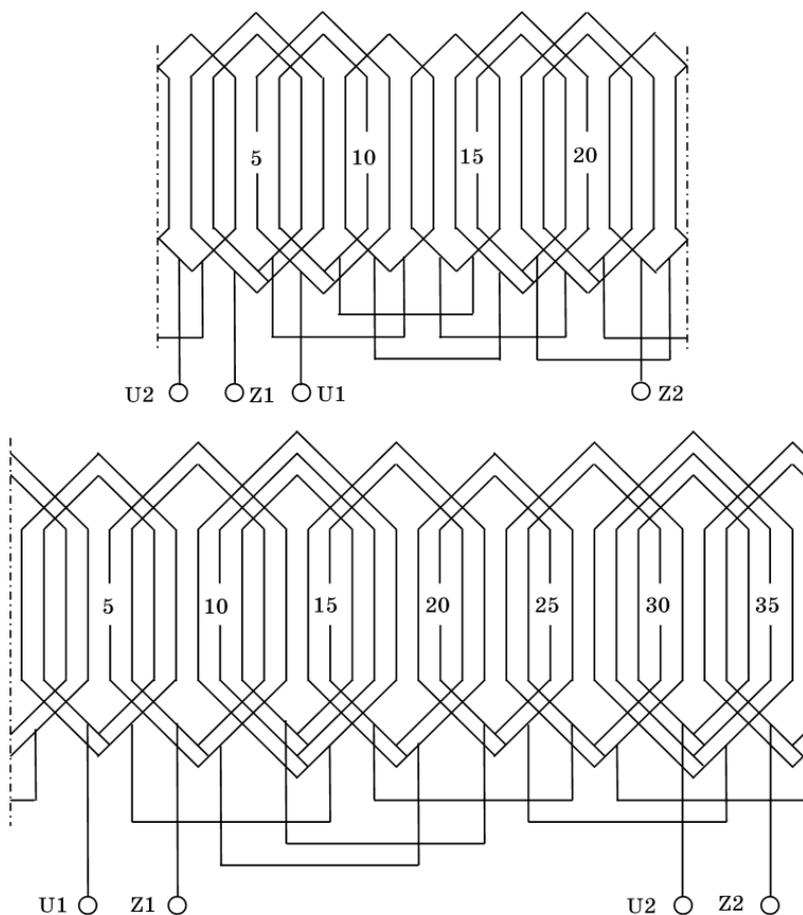


Рис. 3.66
Схемы четырехполюсных обмоток

Рациональные схемы статорных обмоток однофазных конденсаторных двигателей показаны на рисунках 3.65 и 3.66. Для надежного разбега двигателей на время их пуска к рабочему конденсатору подключают пусковой конденсатор C_{II} . Однодвухслойная обмотка улучшает пуск двухполюсных двигателей.

В качестве конденсаторных двигателей могут служить и двигатели основного исполнения малой мощности (рис. 3.67).

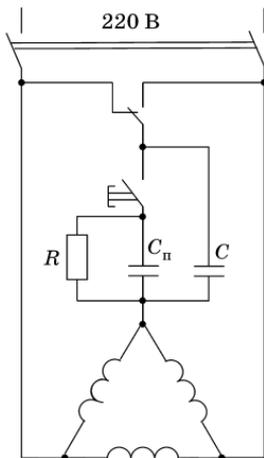


Рис. 3.67
Ревверсивная схема
включения двигателя
в однофазную сеть

Для них в режиме работы с круговым магнитным полем $\cos\varphi_n = \cos 60^\circ$, $Q_{дв} = 1,73U_n I_{1н} \sin\varphi_n = 1,5U_n I_{1н}$ и $C \approx 4780I_{1н}/U_n$ мкФ.

Расчет емкости рабочего конденсатора двигателя АИР71А2 ($I_{1н} = 1,75$ А) при включении в однофазную сеть 220 В.

$$C = 4780 \cdot 1,75 \cdot 10^6 / 220 = 38 \text{ мкФ.}$$

Конденсаторные двигатели с трехфазной обмоткой уступают двигателям с двухфазной обмоткой по мощности практически в $\cos 45^\circ / \cos 60^\circ$ раза (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Сравнительные данные конденсаторных двигателей

Типоразмер двигателя	$P_{2н}$, Вт	Соединение фаз	Рабочая обмотка		Конденсаторная обмотка		C_p/C_n , мкФ
			w_k	d , мм	w_k	d , мм	
АИРЕ71А2	0,75	L	50	0,75	50	0,75	33
АИРУЕ71А2							33/80
АИРЗЕ71А2	0,55	Δ	78	0,60	78	0,60	37
АИРЗУЕ71А2							37/200
АИРЕ71В2	1,1	L	44	0,80	44	0,80	45
АИРУЕ71В2							45/175
АИРЗЕ71В2	0,75	Δ	65	0,67	65	0,67	55
АИРЗУЕ71В2							55/250
АИРЕ71А4	0,55	L	57	0,63	73	0,56	27
АИРУЕ71А4							27/103
АИРЗЕ71А4	0,37	Δ	87	0,53	87	0,53	30
АИРЗУЕ71А4							30/120
АИРЕ71В4	0,75	L	41	0,75	48	0,71	37
АИРУЕ71В4							37/113
АИРЗЕ71В4	0,55	Δ	69	0,60	69	0,60	45
АИРЗУЕ71В4							45/140

3.14. АСИНХРОННАЯ МАШИНА В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА

Генераторный режим включенной в сеть асинхронной машины наступает, когда с помощью приводного устройства частота вращения ротора становится больше частоты вращения магнитного поля (при скольжении $s < 0$). В этом режиме работы активная составляющая тока ротора

$$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2 = I_2 \frac{\frac{R_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + x_2^2}},$$

а также активная мощность $P_1 = mU_{\text{н}}I_1 \cos \varphi$ ($\varphi > 90^\circ$, рис. 3.68) меняют знак. Генератор выдает в сеть активную мощность, а его тормозной момент уравнивает момент приводного двигателя.

Реактивная составляющая тока ротора

$$I_{2p} = I_2 \sin \psi_2 = I_2 \frac{x_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}$$

не зависит от знака скольжения, и асинхронный генератор, как и двигатель, является потребителем реактивной мощности.

В автономной электростанции источником реактивной мощности служат конденсаторы. При наличии в магнитопроводе генератора остаточного магнитного потока с числом периодов равным числу пар полюсов статорной обмотки процесс самовозбуждения генератора подобен физическому процессу в последовательном колебательном контуре:

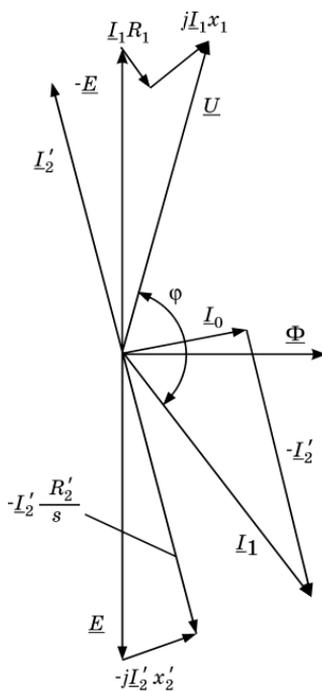


Рис. 3.68
Векторная диаграмма генератора

$$L \frac{d^2 q_t}{dt^2} + R_1 \frac{dq_t}{dt} + \frac{q_t}{C} = -e_t,$$

где q_t и e_t — изменяющийся заряд на обкладках конденсатора и наводимая в статорной обмотке ЭДС; L — индуктивность контура; R_1 — активное сопротивление статорной обмотки.

Установившиеся значения тока возбуждения и напряжения определяет пересечение вольтамперной характеристики конденсатора с характеристикой намагничивания генератора (рисунок 3.69, без учета падения напряжения на сопротивлении R_1).

Ток возбуждения генератора

$$I_\mu = \frac{E}{x_\mu} \approx \frac{E}{x_c - x_1},$$

где x_c — сопротивление конденсатора.

Балансу энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля генератора

$$\frac{CU_c^2}{2} = \frac{CI_\mu^2}{2(\omega C)^2} = \frac{LI_\mu^2}{2}$$

отвечает частота генерируемых электромагнитных колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

При расчете базовой емкости конденсатора необходимо учитывать размагничивающее действие реактивной составляющей тока ротора. Степень размагничивания приведенной реактивной составляющей номинального тока

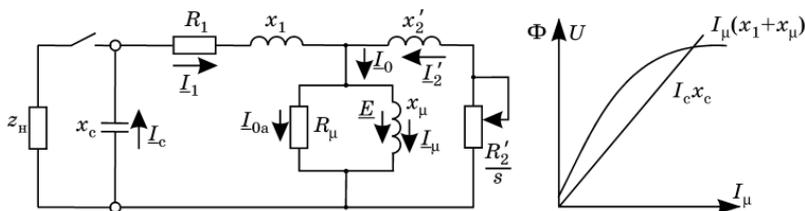


Рис. 3.69

Схема замещения асинхронного генератора

ротора $I'_{2p}/I_{\mu 0}$, где $I_{\mu 0}$ — намагничивающий ток при холостом ходе генератора.

Уменьшить размагничивание генератора при нагрузке можно применением автотрансформаторного варианта статорной обмотки. У варианта автотрансформаторной двухполюсной обмотки с шагом $y = 15$ (рис. 3.70) в одних

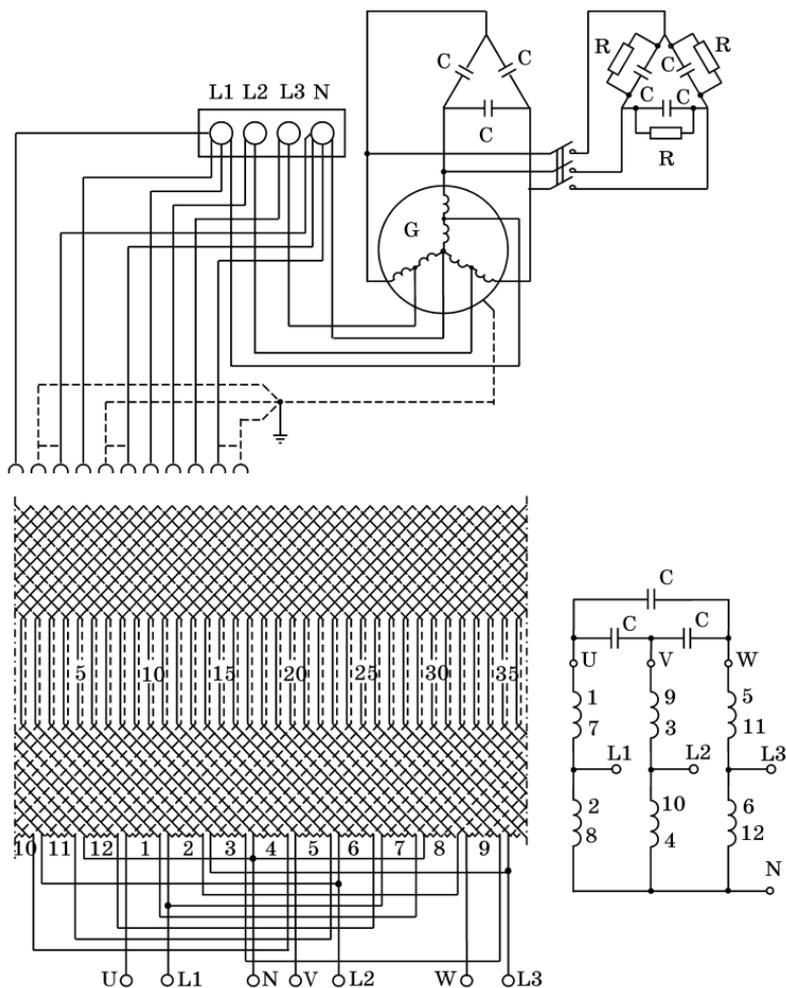


Рис. 3.70

Схема соединений асинхронного генератора и вариант схемы автотрансформаторной двухполюсной обмотки

и тех же пазах статора расположены стороны катушек последовательной части обмотки с намагничивающим током и стороны катушек общей части с током намагничивания и током нагрузки. Стартовые конденсаторы $C_{ст}$ подключают на время пуска от автономной электростанции короткозамкнутого асинхронного двигателя. Степень использования габарита асинхронной машины в режиме генератора по сравнению с режимом двигателя, как правило, ниже.

Расчет автотрансформаторной обмотки генератора на габарите АИР112М2. Данные АИР112М2 приведены ранее.

Для снижения степени размагничивания генератора при нагрузке увеличиваем воздушный зазор до $\delta = 0,8$ мм (у базового двигателя $\delta = 0,6$ мм) и индукцию в воздушном зазоре до $B_\delta = 0,76$ Тл (у базового двигателя $B_\delta = 0,71$ Тл).

Принимаем соотношение ЭДС $E_U/E_{L1} = 2/1,73 = 277/240$ В.

Поток и число витков на фазу ($E_U = E$):

$$\Phi = B_\delta D l / p = 0,76 \cdot 0,108 \cdot 0,125 / 1 = 10,26 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$w = E / (222 k_{оф} \Phi) = 277 / (222 \cdot 0,9235 \cdot 10,26 \cdot 10^{-3}) = 132.$$

Общая часть обмотки содержит 114 витков, в последовательную часть входит 18 витков. В катушке общей части 19 витков из двух проводов. В катушке последовательной части 3 витка из одного провода.

В пазу $N = 41$ проводник.

При площади изолированного паза для изолированных проводников условного квадратного сечения $Q = 64$ мм² диаметр провода

$$d_{из} = \sqrt{\frac{Q}{N}} = \sqrt{\frac{64}{41}} = 1,25 \text{ мм.}$$

Выбираем $d/d_{из} = 1,12/1,20$ мм.

Сечение провода $S = 0,99$ мм².

Активное сопротивление частей обмотки при длине витка $l_b = 0,7$ м:

$$R_{11} = 0,0223 w l_b / 2S = 0,0223 \cdot 114 \cdot 0,7 / 1,98 = 0,90 \text{ Ом};$$

$$R_{12} = 0,0223 w l_b / S = 0,0223 \cdot 18 \cdot 0,7 / 0,99 = 0,28 \text{ Ом.}$$

Намагничивающий ток генератора (принятой индукции соответствует $k_\mu \approx 2,0$)

$$I_\mu = \frac{B_\delta \pi \delta k_\delta k_\mu}{\sqrt{2} m w k_{06} \mu_0} = \frac{0,76 \cdot 3,1416 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,0}{1,414 \cdot 3 \cdot 132 \cdot 0,9235 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 7,06 \text{ А.}$$

При новых значениях воздушного зазора и коэффициента насыщения магнитной цепи индуктивное сопротивление роторной обмотки

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 f l (\lambda_{п2} + \lambda_{кл2} + \lambda_{д2} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,125 \cdot (2,44 + 0,64 + 1,05 + 0,406) \cdot 10^{-6} = \\ &= 2,24 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Из выражения

$$I_{2н} \approx \frac{s_n U / k_e \cdot R_2}{R_2^2 + (x_2 s_n)^2} = \frac{s_n U / k_e \cdot R_2}{R_2^2} = \frac{s_n (277 / 244) \cdot 10^4}{0,90} = 258 \text{ А}$$

номинальное скольжение $|s_n| = 0,0205$, где $k_e = w k_{06} / (w_2 k_{062}) = 132 \cdot 0,9235 / (0,5 \cdot 0,999) = 244$.

Реактивный ток ротора и его приведенное значение:

$$\begin{aligned} I_{2p} &= I_2 \frac{x_2 \cdot s_n}{R_2} = 258 \cdot \frac{2,24 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0205}{0,90 \cdot 10^{-4}} = 13,3 \text{ А;} \\ I'_{2p} &= \frac{I_{2p}}{k_i} = \frac{13,3}{26,15} = 0,51 \text{ А,} \end{aligned}$$

где $k_i = m w k_{06} / m_2 w_2 k_{062} = 3 \cdot 132 \cdot 0,9235 / (28 \cdot 0,5 \cdot 0,999) = 26,15$.

Степень размагничивания номинального тока ротора

$$\frac{I'_{2p}}{I_\mu + I'_{2p}} = \frac{I'_{2p}}{I_{\mu 0}} = \frac{0,51}{7,06 + 0,51} = 0,067.$$

Напряжение на конденсаторах при соединении в треугольник, сопротивление, емкость и рабочее напряжение конденсаторов:

$$U_c = \sqrt{3} \frac{E}{k_E} = \sqrt{3} \frac{277}{0,98} = 490 \text{ В};$$

$$x_c = \frac{U_c}{\frac{1}{\sqrt{3}} I_{\mu 0}} = \frac{490}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (1,067 I_{\mu})} = \frac{490}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 7,57} = 112 \text{ Ом};$$

$$C = \frac{10^6}{\omega x_c} = \frac{10^6}{314 \cdot 112} = 28,4 \text{ мкФ};$$

$$U_{cp} \geq 1,414 \cdot 490 \geq 693 \text{ В}.$$

При нагрузке потери в последовательной части обмотки от намагничивающего тока $3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_{12} = 3 \cdot 7,06^2 \cdot 0,28 = 42 \text{ Вт}$. Разности потерь в обмотке базового двигателя и в последовательной части обмотки генератора ($402 - 42 = 360 \text{ Вт}$) соответствует номинальный ток генератора (без учета размагничивания тока нагрузки), а также номинальный ток активной нагрузки:

$$I_n = \sqrt{\frac{360}{m R_{11}}} = \sqrt{\frac{360}{3 \cdot 0,90}} = 11,54 \text{ А};$$

$$I_{на} = \sqrt{I_y^2 - I_{\mu}^2} = \sqrt{11,54^2 - 7,06^2} = 9,1 \text{ А}.$$

В варианте обмотки на рисунке 3.71 проводники частей расположены в тех же пазах и могут иметь разное сечение, учитывая характер изменения тока при нагрузке на выводах «Н».

3.15. ОСОБЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Работа в режиме индукционного регулятора, регулируемой реактивной катушки, фазорегулятора. В режиме индукционного регулятора одну из обмоток асинхронной машины с фазным ротором — статора или ротора, называемую первичной или питающей, присоединяют к сети, а другую, называемую вторичной или проходной, включают между сетью и нагрузкой, требующей плавного изменения напряжения.

При выборе питающей обмотки и схемы ее соединения прежде всего исходят из соответствия номинального напряжения обмотки напряжению сети. При использовании

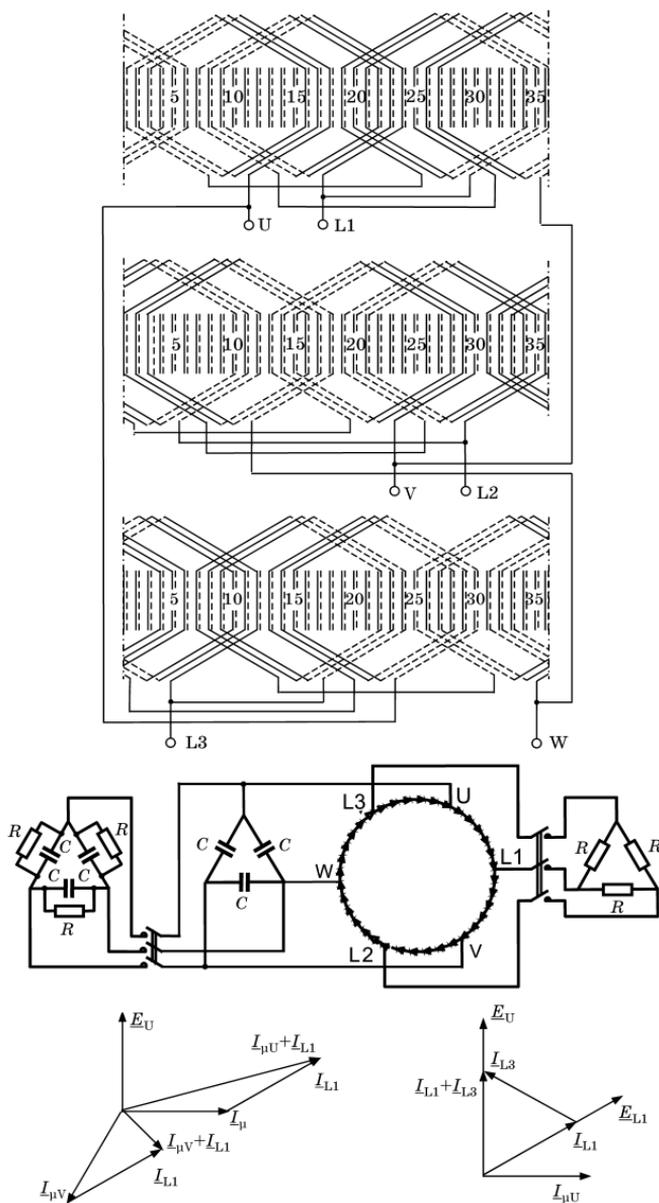


Рис. 3.71

Схема соединения фаз двухполюсной обмотки, схема включения конденсаторов и характер изменения токов в частях фазной обмотки при активной нагрузке

в качестве питающей обмотки ротора, обычно соединенной в звезду, вывод от нее дополнительно трех концов связан с разборкой машины. Необходимо также учитывать заданные пределы регулируемого напряжения ($U_{2\max}$ и $U_{2\min}$). Схема индукционного регулятора показана на рисунке 3.72. Ток, протекающий по первичной обмотке, создает вращающееся магнитное поле, которое наводит в фазах проходной обмотки ЭДС. Вторичное фазное напряжение $\underline{U}_2 = \underline{U}_1 + \underline{E}_2$ зависит от расположения осей обмоток статора и ротора.

Поворачивая ротор на угол α , изменяя взаимное расположение осей обмоток соответствующих фаз ротора и

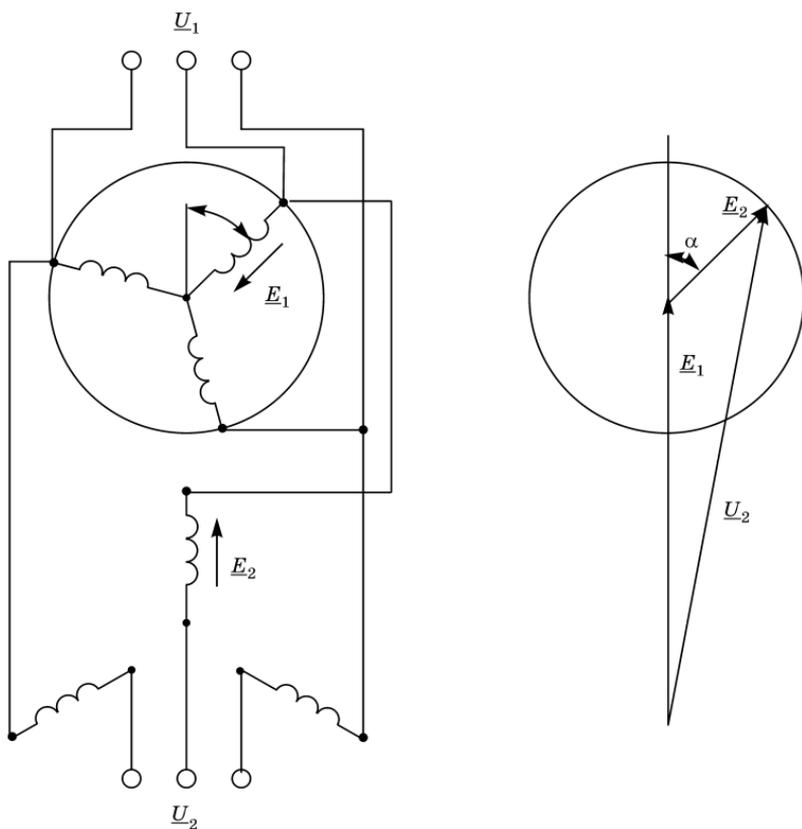


Рис. 3.72

Схема индукционного регулятора и диаграмма напряжений

статора, вызывают сдвиг по фазе ЭДС E_2 и первичного напряжения U_1 . В соответствии с этим вторичное напряжение U_2 изменяется от $U_{2\max} = U_1 + E_2$ до $U_{2\min} = U_1 - E_2$, что является пределами регулируемого напряжения. Если $E_2 = U_1$, то соответственно $U_{2\max} = 2U_1$, $U_{2\min} = 0$.

Плавное симметричное регулирование трехфазного напряжения — основное достоинство индукционного регулятора.

В режиме регулируемой реактивной катушки обмотки статора и ротора соединяют последовательно. Если угол между осями обмоток соответствующих фаз статора и ротора равен нулю, то в сеть включено число эффективных витков $w = (w_1 k_{061} + w_2 k_{062})$. Если угол равен 180° , то число эффективных витков $w = (w_1 k_{061} - w_2 k_{062})$. Учитывая, что $U_1 = 4,44 f_1 \Phi w$, в первом случае значение потока Φ мало, следовательно, мало и значение намагничивающего тока I_μ . Во втором случае значение Φ возрастает, следовательно, увеличивается и ток I_μ . Учитывая нелинейную зависимость $\Phi = f(I_\mu)$, возрастание Φ может привести к насыщению магнитной системы и значительному увеличению тока I_μ .

Фазорегулятор представляет собой асинхронную машину с заторможенным фазным ротором. В отличие от индукционного регулятора обмотки статора и ротора не имеют электрической связи. Поворачивая ротор относительно статора, можно плавно изменять фазу ЭДС ротора, не изменяя по величине.

Асинхронные исполнительные двигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт — важные элементы систем автоматики, служат для преобразования подводимого электрического сигнала в механическое перемещение вала. При заданной нагрузке на валу частота вращения исполнительного двигателя должна строго соответствовать сигналу, поэтому часто такие двигатели называют асинхронными исполнительными двигателями. Их изготавливают преимущественно двухфазными. На статоре располагают две обмотки — возбуждения и управления, оси которых смещены в электрическом измерении на 90° . Даже при полной идентичности обмоток двухфазные двигатели несимметричны. Поле, близкое к круговому

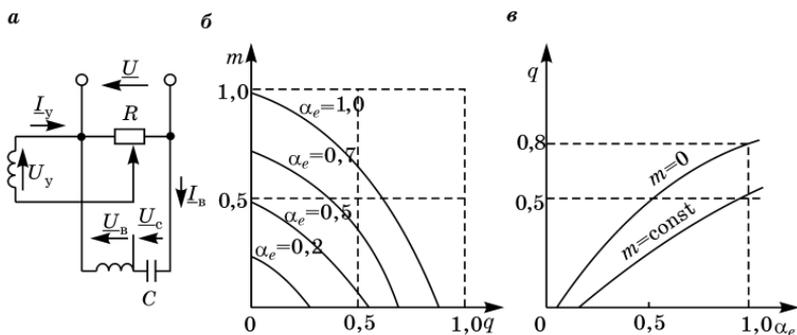


Рис. 3.73

Схема включения (а), механические (б) и регулировочные (в) характеристики асинхронного исполнительного двигателя

полю, достигается у них при пуске. Схема на рисунке 3.73 соответствует наиболее широко используемому способу амплитудно-фазового управления.

Как и в однофазных двигателях, момент M исполнительного двигателя представляет собой разность моментов от прямого $M_{\text{пр}}$ и обратного $M_{\text{обр}}$ поля. Одним из важных свойств исполнительного двигателя должно быть отсутствие самохода ротора при снятии сигнала с управляющей обмотки. В этом случае ротор должен останавливаться без применения каких-либо тормозных устройств. Это требование выполняется благодаря высокому значению активного сопротивления ротора, при котором критическое скольжение исполнительного двигателя больше единицы.

На рисунке 3.73б приведены механические характеристики исполнительного двигателя в относительных единицах $m = f(q)$, где m — вращающий момент в долях его пускового момента при круговом вращающемся поле; $q = \omega_2/\omega_1 = n_2/n_1$ — относительная угловая скорость или относительная частота вращения ротора. Механические характеристики приведены при различных значениях эффективного коэффициента сигнала α_e , под которым понимают отношение приведенного напряжения обмотки управления $U'_y = k_e U_y$ к напряжению сети U_1 , т. е. $\alpha_e = k_e U_y / U_1$, где $k_e = k_{\text{обв}} w_b / k_{\text{обв}y} w_y$ — коэффициент приведения обмотки управления к обмотке возбуждения ($k_{\text{обв}}$ и w_b — обмоточный коэффициент и число витков обмотки

возбуждения; $k_{обу}$ и w_y — обмоточный коэффициент и число витков обмотки управления).

На рисунке 3.73в на основе кривых, изображенных на рисунке 3.72б, построены регулировочные характеристики исполнительного двигателя $q = f(\alpha_e)$ при определенном моменте m .

Роторы асинхронных исполнительных двигателей выполняют короткозамкнутыми (двигатели типа АД, ДМ, ДАМ), а также в виде тонкостенного немагнитного полого цилиндра (двигатели типа АДП, ЭММ, ДИД, ДУПС, ДАУ). Двигатели с короткозамкнутым ротором имеют увеличенную длину ротора и небольшой его диаметр. Эта особенность конструкции ротора обусловлена необходимостью уменьшения механической инерции ротора и повышения быстродействия двигателя при отработке сигнала.

Асинхронные исполнительные двигатели с немагнитным полым ротором характеризуются минимальной механической инерцией ротора и максимальным быстродействием. Под быстродействием исполнительных двигателей понимают достижение установившейся частоты вращения ротора за минимальное время от начала подачи управляющего сигнала. Конструктивно асинхронный исполнительный двигатель с немагнитным полым ротором имеет обычный сердечник статора, неподвижный сердечник ротора, укрепленный на одном из подшипниковых щитов, и вращающийся ротор в виде тонкостенного (0,3–0,6 мм) немагнитного (обычно из алюминия) полого цилиндра. Сердечники статора и ротора собраны из листовой электротехнической стали. Сердечник ротора не имеет пазов и выполняет только роль магнитопровода.

Электромагнитный момент в исполнительном двигателе с немагнитным полым ротором появляется в результате взаимодействия вращающегося поля с вихревыми токами цилиндра.

Асинхронные тахогенераторы служат для измерения угловой скорости или частоты вращения валов, а также для выработки сигналов в автоматических устройствах. Их конструкция подобна конструкции асинхронных исполнительных двигателей с немагнитным полым ротором.

На статоре тахогенератора расположены две однофазные обмотки, сдвинутые на 90° эл. Одна из этих обмоток — это обмотка возбуждения, другая — генераторная.

При неподвижном роторе-цилиндре в генераторной обмотке ЭДС равна нулю, так как взаимная индукция обмоток возбуждения и генераторной при указанном их сдвиге отсутствует.

Полый ротор можно представить совокупностью ряда «элементарных проводников». При вращении ротора производственным механизмом «элементарные проводники» пересекают пульсирующее магнитное поле обмотки возбуждения, и в них наводится ЭДС вращения. ЭДС вращения вызывает в цилиндре ток, создающий по оси генераторной обмотки поперечную составляющую пульсирующего поля ротора. Это поле, пульсируя с частотой вращения цилиндра, образует в генераторной обмотке ЭДС вращения. Ее зависимость от частоты вращения ротора может отклоняться от прямолинейной вследствие изменения сопротивлений обмоток статора и ротора, а также воздействия поля ротора (особенно составляющей, действующей по оси обмотки возбуждения) на поле обмотки возбуждения. Это отклонение называется *амплитудной погрешностью тахогенератора*.

Крутизна зависимости $U = f(n_2)$ — нарастание выходного напряжения ΔU_r на 1000 об/мин составляет обычно 5–10 В. Диапазон измерения частоты вращения составляет от 0 до 10 000 об/мин.

3.16. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Универсальные коллекторные двигатели (УКД) мощностью от нескольких единиц до сотен ватт получили широкое распространение в ручном электроинструменте, а также и в некоторых видах бытовой техники — в швейных и полотерных машинах, пылесосах, мясорубках и др.

Двигатели работают от сети постоянного и переменного тока, развивают высокий пусковой момент и номинальный вращающий момент, имеют небольшие размеры и массу.

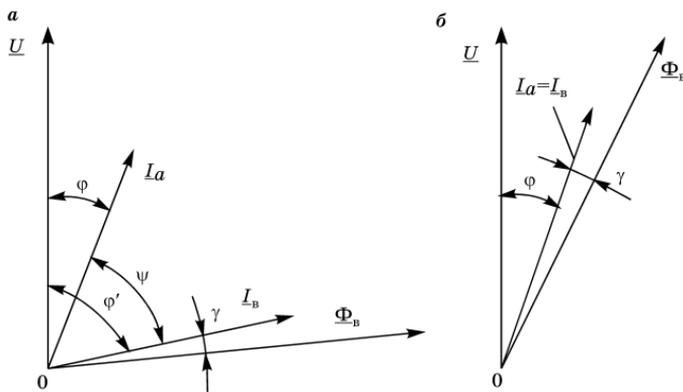


Рис. 3.74

Векторные диаграммы напряжений и токов при параллельном (а) и последовательном (б) возбуждении

В конструктивном отношении универсальные коллекторные двигатели имеют существенное отличие от машин постоянного тока. Магнитопровод статора такого двигателя для уменьшения потерь в стали набирают из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм.

Для выявления особенностей работы УКД рассмотрим векторные диаграммы двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения, включенных в сеть переменного тока (рис. 3.74).

В двигателе параллельного возбуждения вследствие значительной индуктивности обмотки возбуждения между токами якоря I_a и возбуждения I_b имеется большой фазовый сдвиг. В двигателе последовательного возбуждения фазового сдвига между токами нет. В обоих случаях между током I_b и потоком Φ имеется небольшой угол γ , который обусловлен потерями в стали магнитопровода.

При синусоидальном потоке $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ и в общем представлении для обеих схем тока якоря $i_a = \sqrt{2} I_{am} \times \sin(\omega t + \psi + \gamma)$ по мгновенным значениям момента УКД $m = c \Phi i_a$ можно определить среднее значение момента двигателя M за период T изменения тока в цепи якоря:

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = c \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} I_{am} \cos(\psi + \gamma).$$

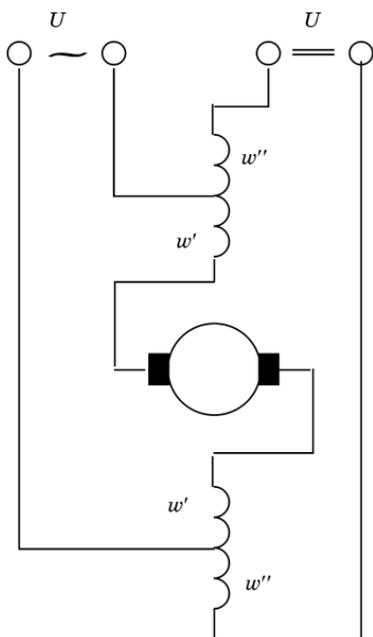


Рис. 3.75

Принципиальная схема УКД

Из этого выражения следует, что величина момента M не зависит от времени и она значительно больше у двигателей с последовательным возбуждением, у которых $\psi = 0$.

Для двигателя с последовательным возбуждением

$$M = c \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} I_{am} \cos \gamma.$$

С целью получения высокого значения вращающего момента в универсальном коллекторном двигателе используют последовательное возбуждение (рис. 3.75). На полюсах двигателя размещают обмотку возбуждения из двух частей. Часть обмотки с числом витков w'_B — для

работы двигателя в сети переменного тока. Другая часть обмотки с числом витков w''_B подключается последовательно к первой части обмотки при включении двигателя в сеть постоянного тока того же напряжения.

При работе двигателя от сети переменного тока потребляемый ток I_a создает два потока — поток обмотки возбуждения с амплитудой Φ_m , пульсирующий по оси полюсов, и поток реакции якоря с амплитудой Φ_{qm} , пульсирующий по поперечной оси (по оси щеток).

Из определения действующего значения ЭДС якорной обмотки от потока реакции якоря

$$E_q = \frac{\omega \Psi_{qm}}{\sqrt{2}}$$

потокосцепление якорной обмотки с числом эффективных витков $w_a k_{оба}$

$$\Psi_{qm} = w_a k_{оба} \Phi_{qm}.$$

ЭДС якорной обмотки от потока реакции якоря

$$E_q = \frac{E_{qm}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \Psi_{qm}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f w_a k_{\text{оба}} \Phi_{qm}}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_a k_{\text{оба}} \Phi_{qm},$$

где f — частота сети.

От потока возбуждения в обмотке возбуждения наводится ЭДС

$$E_b = 4,44 f w'_b \Phi_m.$$

Наконец, при вращении якоря в его обмотке от пересечения ее проводниками пульсирующего потока обмотки возбуждения наводится ЭДС вращения

$$E_a = c \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \omega_2.$$

Таким образом, приложенное к двигателю напряжение U уравнивается ЭДС E_b , E_q , E_a , а также падениями напряжения на активных сопротивлениях цепи якоря и обмотки возбуждения $I_a (R_a + R'_b)$ с числом витков w'_b и на индуктивных сопротивлениях от потоков рассеяния обмоток якоря и возбуждения $I_a (x_a + x'_b)$. На рисунке 3.76 показана векторная диаграмма двигателя, работающего в сети переменного тока (\underline{E}_a направлена навстречу току \underline{I}_a).

Из диаграммы можно определить действующее значение переменного тока якоря

$$I_{a-} = \frac{U \cos \varphi - E_a}{R_a + R'_b}.$$

Из последних выражений можно определить угловую скорость якоря при работе двигателя в сети переменного тока:

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{2} E_{a-}}{c \Phi_m} = \frac{\sqrt{2} [U \cos \varphi - I_a (R_a + R'_b)]}{c \Phi_m}.$$

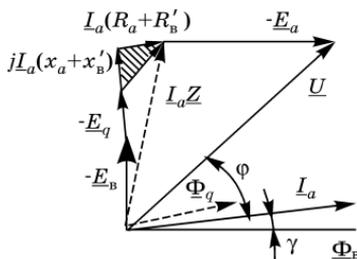


Рис. 3.76
Векторная диаграмма при включении в сеть переменного тока

При включении двигателя теми же зажимами в сеть постоянного тока величина ЭДС якоря

$$E_a = U - I_a (R_a + R')$$

в значительной мере увеличивается по сравнению с ЭДС

$$E_{a-} = U \cos \varphi - I_a (R_a + R'_b)$$

при работе двигателя от сети переменного тока. Следовательно, при работе двигателя в сети постоянного тока в значительной мере будет возрасть и угловая скорость якоря ω_2 .

Для того чтобы угловая скорость двигателя при работе от сети постоянного тока оставалась такой же, как и при его работе от сети переменного тока, необходимо усилить поток возбуждения. Для этого на полюсах двигателя и предусмотрена дополнительная часть обмотки возбуждения с числом витков w''_b , включаемых последовательно с витками w'_b .

При работе двигателя в сети постоянного тока его угловая скорость

$$\omega_2 = \frac{U - I_a (R_a + R'_b + R''_b)}{c\Phi},$$

где R''_b — сопротивление обмотки возбуждения с числом витков w''_b ; Φ — поток, создаваемый обеими составляющими обмотки возбуждения.

Характеристики универсального коллекторного двигателя при работе от сети переменного тока аналогичны его характеристикам при работе от сети постоянного тока, т. е. подобны характеристикам двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Синхронной машиной называют электрическую машину переменного тока, у которой частота вращения ротора находится в строго постоянном соответствии с частотой тока в цепи, подключенной к обмотке статора. Наибольшее распространение синхронные машины получили в качестве генераторов электроэнергии. Синхронные генераторы в комплекте с приводом от паровой или газовой турбины называют турбогенераторами, с приводом от водяной турбины — гидрогенераторами и с приводом от дизеля — дизельгенераторами.

Принципиальная схема трехфазного синхронного генератора показана на рисунке 4.1. Сердечник статора запрессован в корпус. Обмотка возбуждения LG на роторе питается постоянным током и создает поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$. Плюсовые наконечники ротора выполнены таким образом,

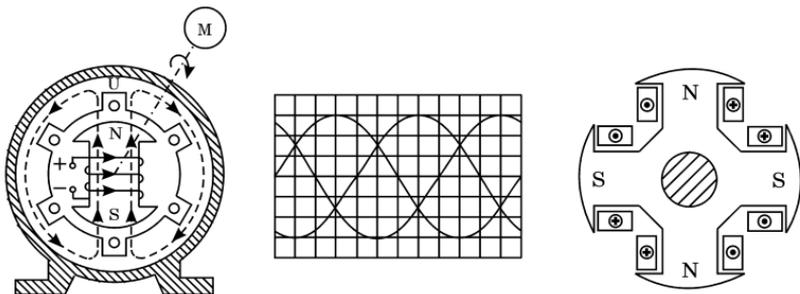


Рис. 4.1

Принципиальное устройство синхронного генератора с явно выраженными полюсами ротора

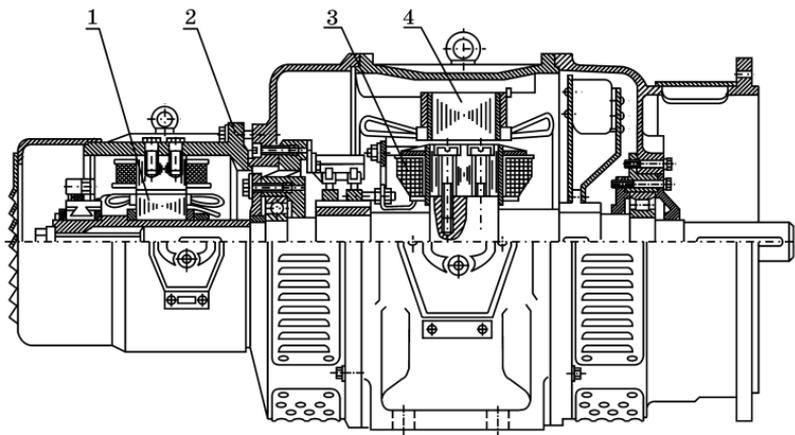


Рис. 4.2

Вид генератора автономной электростанции:

1 — якорь возбудителя; 2 — возбудитель; 3, 4 — статор (якорь) и ротор (индуктор) генератора.

чтобы поток возбуждения на полюсном делении был близким к синусоиде. Двухполюсные и четырехполюсные генераторы с явно выраженными полюсами ротора применяются в основном в электростанциях с приводом от бензиновых или дизельных двигателей. Обмотка возбуждения на роторе питается от отдельного генератора постоянного тока, размещаемого на общем валу с синхронным генератором, или от выпрямителей при самовозбуждении генератора.

При вращении ротора поток возбуждения наводит в фазных обмотках статора ЭДС. Для генерирования ЭДС частотой $f = 50$ Гц частота вращения ротора должна составлять $n_2 = 60f/p = 3000/p$ об/мин, где p — число пар полюсов.

В синхронных генераторах ротор часто называют индуктором, статор — якорем, а машину постоянного тока, питающую обмотку возбуждения индуктора, — возбудителем (рис. 4.2).

Действующее значение ЭДС обмотки якоря с wk_{06} витками

$$E_0 = 4,44fwk_{06}\Phi_B.$$

При нагрузке ток якоря I_a создает МДС основной гармоника

$$F_a = \frac{m\sqrt{2}I_a w k_{об}}{\pi p} \sin(\omega t - px)$$

с частотой вращения $n_1 = 60f/p$ об/мин.

Магнитное поле якоря неподвижно относительно магнитного поля возбуждения ($n_2 = n_1$), следовательно, эти поля могут взаимодействовать. Силы взаимодействия полей образуют электромагнитный момент, нагружающий приводной двигатель и стремящийся замедлить вращение ротора. Для поддержания постоянной частоты вращения увеличивают момент приводного устройства.

Турбогенераторы тепловых электростанций характеризуются высокими технико-экономическими показателями при большой частоте вращения. Их выполняют, как правило, на 3000 об/мин. Ротор является наиболее напряженной частью турбогенератора в отношении механических и тепловых нагрузок. Его изготавливают из поковки специальной стали, обладающей высокими магнитными и механическими свойствами. На поверхности ротора фрезеруют пазы, в которые укладывают катушки обмотки возбуждения. Примерно на одной трети полюсного деления обмотку не укладывают, и эта часть образует большой зубец, через который проходит основная часть магнитного потока (рис. 4.3).

При таком исполнении ротора коэффициент формы МДС обмотки возбуждения k_f , определяемый соотношением

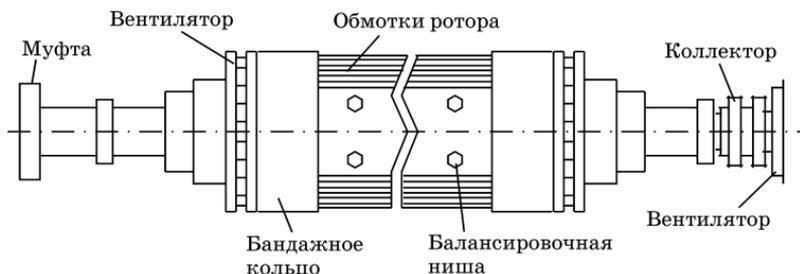


Рис. 4.3
Вид ротора турбогенератора

амплитуды основной гармоники МДС F_{B1} к МДС на полюс $F_B = I_B w_B$, близок к единице, $k_f = F_{B1}/F_B \approx 1$. Коэффициент формы МДС является и коэффициентом формы магнитного поля $k_f = B_{B1}/B_B$, где B_{B1} — амплитуда основной гармоники индукции, B_B — наибольшее значение индукции на полюсном делении, поскольку для турбогенератора можно считать магнитное сопротивление одинаковым по всему периметру ротора.

Ротор турбогенератора вращается в подшипниках скольжения, расположенных на отдельных стойках, или в торцевых щитах статора. Из-за больших центробежных сил, действующих на обмотку возбуждения, ее крепление в пазах производят с помощью немагнитных металлических клиньев. Немагнитные клинья ослабляют магнитные потоки пазового рассеяния, которые могут вызывать насыщение зубцов ротора и приводить к уменьшению полезного потока. Лобовые части обмотки закрепляют бандажами. Выводы от обмотки подсоединяют к кольцам щеточно-контактного аппарата.

Сердечник статора составляют пакеты, образованные из листов электротехнической стали. Между отдельными пакетами оставляют вентиляционные каналы. В пазы сердечника статора укладывают двухслойную стержневую обмотку, крепят клиньями, а лобовые части укрепляют на специальных кольцах, расположенных в торцевой части статора. Сердечник помещают в стальной корпус, закрываемый с торцов щитами. В турбогенераторах с водородным охлаждением корпус должен обладать не только прочностью, но и газонепроницаемостью.

У гидрогенераторов ротор выполнен с явно выраженными полюсами (рис. 4.4), что допустимо с точки зрения механической прочности, и в то же время облегчает выполнение обмотки возбуждения. Ротор непосредственно соединен с валом рабочего колеса гидротурбины. Возбуждение через щеточно-контактный аппарат осуществляется от вспомогательного генератора постоянного тока, установленного на валу гидрогенератора. Частота вращения ротора, соответственно и его число пар полюсов колеблет-

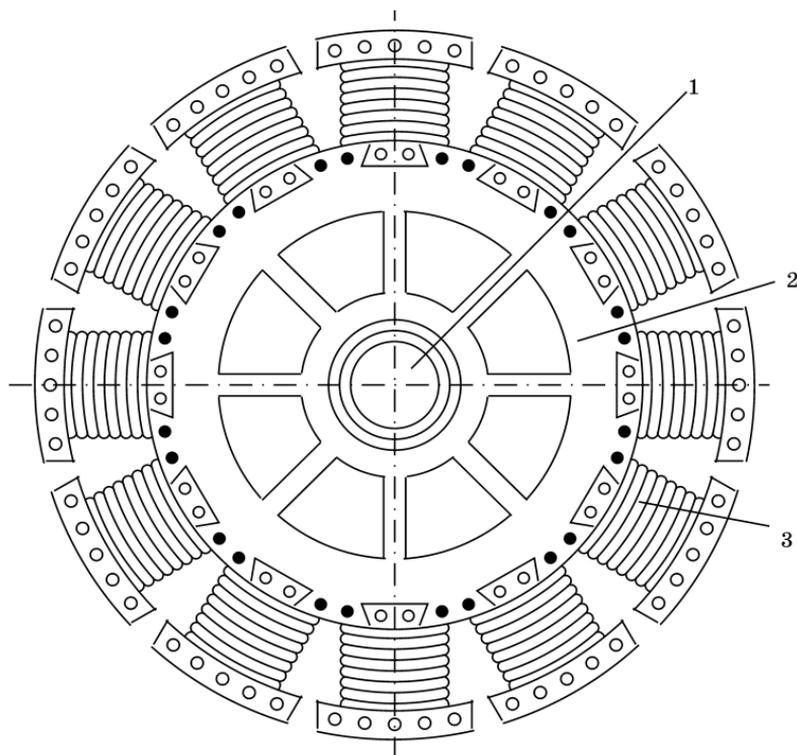


Рис. 4.4

Вид ротора гидрогенератора:

1 — вал с кольцами; 2 — обод; 3 — полюс с катушкой возбуждения.

ся в широких пределах, что объясняется разнообразием напора и расхода воды на гидроэлектростанциях. Полюсы ротора гидрогенератора собирают из стальных листов толщиной 1–2 мм и монтируют с помощью специальных выступов на втулке (ободе) ротора. Для достижения формы магнитного потока возбуждения близкой к синусоиде воздушный зазор между полюсным наконечником и статором выполняют увеличивающимся в направлении краев полюсного наконечника. В этом случае значение коэффициента формы магнитного поля возбуждения $k_f = B_{в1}/B_{в}$ практически равно единице.

На полюсах ротора помимо обмотки возбуждения размещают и демпферную или успокоительную короткозам-

кнутую обмотку с равномерно распределенными медными стержнями в пределах полюсных наконечников. При возможном колебании ротора гидрогенератора в пределах части полюсного деления, вызванном, например, ступенчатым изменением нагрузки на гидрогенератор, возникающие в успокоительной обмотке асинхронные моменты способствуют восстановлению синхронного хода ротора без колебаний.

По расположению и конструкции опорного подшипника (подпятника) различают подвесные и зонтичные гидрогенераторы (рис. 4.5).

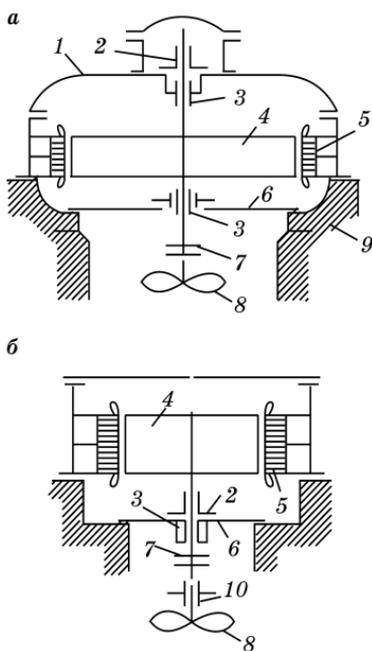


Рис. 4.5
Вид подвешенного (а)
и зонтичного (б)
гидрогенератора:

1 — верхняя крестовина; 2 — подпятник; 3 — направляющие подшипники; 4 — ротор; 5 — статор; 6 — нижняя крестовина; 7 — фланец вала; 8 — турбина; 9 — фундамент; 10 — направляющий подшипник турбины.

В подвешенном гидрогенераторе опорный подшипник, воспринимающий вес вращающихся частей гидроагрегата, а также осевое давление воды на рабочее колесо турбины, расположен выше ротора, на верхней крестовине агрегата. В зонтичном гидрогенераторе подпятник располагается под ротором, на нижней крестовине или на крышке турбины. Вал генератора вращается в двух или трех направляющих подшипниках. Мощные тихоходные гидрогенераторы имеют, как правило, зонтичное исполнение.

Для относительно быстроходных гидрогенераторов меньших габаритов предпочтительнее конструкция подвешенного типа, которая обладает большей устойчивостью к механическим колебаниям ротора, имеет меньший диаметр опорного подшипника.

4.2. ПРИВЕДЕНИЕ МДС ЯКОРЯ К МДС ВОЗБУЖДЕНИЯ, ПАРАМЕТРЫ И ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ГЕНЕРАТОРОВ

При работе синхронного генератора МДС якоря оказывает определенное в зависимости от характера нагрузки влияние на МДС возбуждения. Это влияние называется *реакцией якоря*.

При активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$) расположение МДС якоря и МДС возбуждения перпендикулярны (реакция якоря поперечная) и механическая энергия приводного двигателя преобразуется генератором в используемую нагрузкой электрическую энергию (рис. 4.6). Момент равен нулю и полезного преобразования энергии не происходит, если МДС якоря и возбуждения противоположны или совпадают. Это имеет место при индуктивной или емкостной нагрузке ($\cos\varphi = 0$). При индуктивной нагрузке реакция якоря — продольная размагничивающая, а при емкостной нагрузке реакция якоря — продольная подмагничивающая. При активно-индуктивной нагрузке ($\cos\varphi < 1$) МДС якоря представляют составляющими по продольной оси $F_{ad} = F_a \sin\psi$ и по поперечной оси $F_{aq} = F_a \cos\psi$. Нагрузка генератора на приводной двигатель определяется активной составляющей нагрузки.

При анализе работы генератора необходимо знать, какая часть МДС якоря эквивалентна некоторому значению МДС возбуждения. У явнополюсного генератора ввиду разного магнитного сопротивления по осям d и q коэффициенты формы поля якоря по осям: $k_d = B_{ad1}/B_{ad}$; $k_q = B_{aq1}/B_{aq}$, где B_{ad1} и B_{aq1} — амплитуды основных гармоник индукции, B_{ad} и B_{aq} — наибольшие значения индукции якоря (см. рис. 4.7).

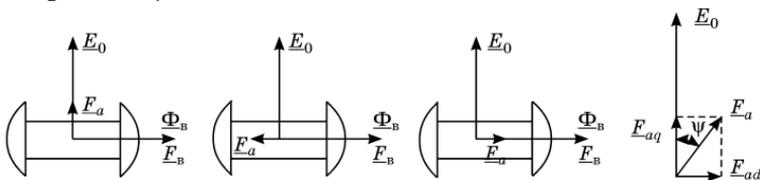


Рис. 4.6

Реакция якоря при разном характере нагрузки

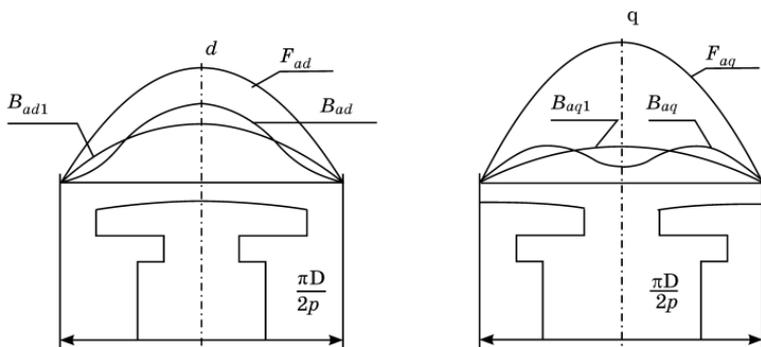


Рис. 4.7

Форма МДС и индукции явнополюсного генератора по осям d и q

МДС возбуждения $F_{вдэ}$, эквивалентную МДС реакции якоря по продольной оси $F_{ад}$, найдем из условия равенства амплитуд основных гармоник магнитного поля, создаваемого МДС, $F_{вдэ}k_f = F_{ад}k_d$ или $F_{вдэ} = k_{ад}F_{ад}$, где $k_{ад} = k_d/k_f$ — коэффициент приведения МДС реакции якоря по продольной оси к МДС возбуждения.

При известном значении коэффициента $k_{ад}$ МДС возбуждения $F_{вдэ}$ и ток возбуждения $I_{вдэ}$ эквивалентны МДС реакции якоря и составляющей тока якоря $I_{ад} = I_a \sin \psi$ по продольной оси:

$$F_{вдэ} = k_{ад}F_{ад} = k_{ад}F_a \sin \psi;$$

$$I_{вдэ} = \frac{k_{ад}F_a \sin \psi}{w_B} = \frac{m\sqrt{2}wk_{об}}{\pi r w_B} k_{ад}I_{ад}.$$

Соответственно при известном значении коэффициента $k_{аq}$:

$$F_{вдэ} = k_{аq}F_{аq} = k_{аq}F_a \cos \psi;$$

$$I_{вдэ} = \frac{k_{аq}F_a \cos \psi}{w_B} = \frac{m\sqrt{2}wk_{об}}{\pi r w_B} k_{аq}I_{аq}.$$

Значение коэффициентов $k_{ад}$ и $k_{аq}$ зависит от ширины полюсного наконечника ротора на полюсном делении якоря. Для обычно принимаемой ширины полюсного наконечника равной $0,7\pi$ — $k_{ад} = 0,84$, $k_{аq} = 0,39$.

Потоки реакции якоря по продольной Φ_{ad} и по поперечной Φ_{aq} оси наводят в обмотке якоря ЭДС $E_{ad} = x_{ad}I_{ad}$ и $E_{aq} = x_{aq}I_{aq}$, где x_{ad} , x_{aq} — индуктивные сопротивления реакции якоря по осям d и q .

У неявнополюсного генератора ввиду равенства магнитных сопротивлений по осям d и q величину МДС обмотки возбуждения $F_{вз}$, эквивалентную МДС реакции якоря F_a , можно найти путем приравнивания МДС F_a к амплитуде МДС возбуждения $k_f F_{вз}$, т. е. $F_a = k_f F_{вз}$. Отсюда определяется коэффициент приведения МДС реакции якоря к МДС возбуждения неявно полюсного генератора $k_a = F_{вз}/F_a = 1/k_f$. Таким образом, $k_f \approx 1$, $k_a \approx 1$.

Принимая $F_{вз} = I_{вз}w_B$, из выражения $F_{вз} = I_{вз}w_B = k_a F_a$ ток возбуждения эквивалентный току якоря

$$I_{вз} = \frac{k_a F_a}{w_B} = \frac{m\sqrt{2}wk_{об}}{\pi r w_B} k_a I_a.$$

МДС реакции якоря F_a определяет поток реакции якоря Φ_a , который наводит в обмотке якоря ЭДС якоря E_a . Коэффициент пропорциональности между ЭДС от потока возбуждения и током якоря $x_a = E_a/I_a$ является индуктивным сопротивлением реакции якоря неявнополюсного генератора.

Индуктивное сопротивление якорной обмотки $x_{\sigma a}$ от потоков рассеяния (пазового, лобовых частей, дифференциального) практически не зависит от расположения оси МДС реакции якоря, поэтому $x_{\sigma d} = x_{\sigma q} = x_{\sigma a}$.

Запишем еще раз параметры, характеризующие синхронные генераторы:

- R_a — активное сопротивление якорной обмотки;
- $x_{\sigma a}$ — индуктивное сопротивление якорной обмотки;
- x_a — индуктивное сопротивление реакции якоря неявнополюсной синхронной машины;
- $x_c = x_a + x_{\sigma a}$ — полное индуктивное сопротивление неявнополюсной синхронной машины;
- x_{ad} — индуктивное сопротивление реакции якоря явнополюсной синхронной машины по продольной оси;
- $x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}$ — полное индуктивное сопротивление явнополюсной синхронной машины по продольной оси;

- x_{aq} — индуктивное сопротивление реакции якоря явнополюсной синхронной машины по поперечной оси;
- $x_q = x_{aq} + x_{\sigma a}$ — полное индуктивное сопротивление явнополюсной синхронной машины по поперечной оси.

Индуктивное сопротивление, при помощи которого учитывается ЭДС, пропорционально магнитной проводимости пути потока, определяющего ЭДС. У явнополюсных генераторов $x_{ad} > x_{aq}$ и $x_d > x_q$. У неявнополюсных генераторов $x_d = x_q = x_c$.

К параметрам синхронных генераторов относят и приведенные сопротивления обмотки возбуждения. Коэффициент k_B приведения параметров обмотки возбуждения к обмотке якоря находят, исходя из равенства потерь в приведенной и реальной обмотках:

- для неявнополюсных машин

$$k_B = \frac{2m\omega^2 k_{\text{об}}^2}{\pi^2 p^2 \omega_B^2} k_a^2;$$

- для явнополюсных машин

$$k_B = \frac{2m\omega^2 k_{\text{об}}^2}{\pi^2 p^2 \omega_B^2} k_{ad}^2.$$

Приведенные активное и индуктивное сопротивления обмотки возбуждения обозначают штрихами: $R'_B = R_B k_B$; $x'_{\sigma B} = x_{\sigma B} k_B$.

Уравнение, связывающее напряжение и ЭДС якорной обмотки явнополюсного генератора:

$$\underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} = \underline{E}_\delta = \underline{U} + \underline{I}_a R_a + j \underline{I}_a x_{\sigma a}.$$

Если пренебречь малой величиной $\underline{I}_a R_a$ и оперировать падениями напряжения на полных индуктивных сопротивлениях x_d и x_q , то

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j \underline{I}_{ad} x_d - j \underline{I}_{aq} x_q.$$

Для неявнополюсной машины, когда $x_q = x_d = x_c$,

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j \underline{I}_a x_c.$$

Вид векторных диаграмм генераторов с ненасыщенной магнитной системой, отвечающих векторным уравнениям,

показан на рисунке 4.8. Отметим на рисунке отрезок AB , равный $E_{aq}/\cos\psi$.

Векторные диаграммы позволяют получить основные характеристики генераторов расчетным путем, не производя непосредственной его нагрузки — величину изменения напряжения генератора при изменении режима нагрузки, величину тока возбуждения при различных нагрузках. Наконец, с их помощью можно определить силовой угол θ — угол сдвига ЭДС E_0 и напряжения на зажимах якоря U . Угол θ играет большую роль при анализе момента и мощности генератора.

При построении диаграмм генераторов с насыщенной магнитной цепью необходимо учитывать фактическое магнитное сопротивление участков магнитной цепи. Определение расчетным путем магнитного состояния машины часто затруднительно, поэтому для указанных целей используют нормальную характеристику холостого хода в относительных единицах (табл. 4.1), которая получена как

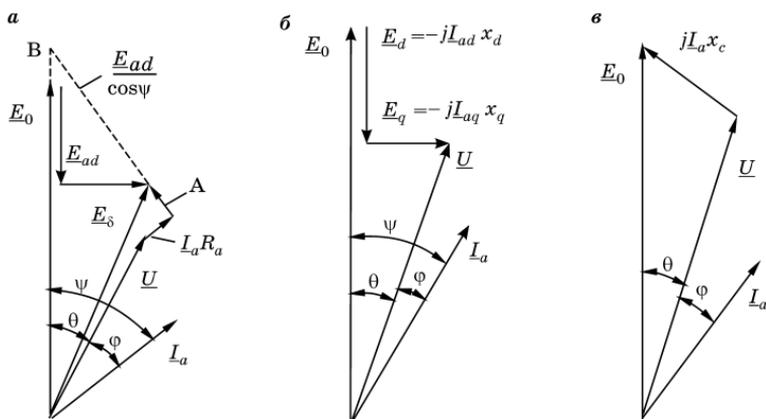


Рис. 4.8

Полная (а) и упрощенная (б) векторные диаграммы явнополюсного генератора, упрощенная векторная диаграмма (в) неявнополюсного генератора

Таблица 4.1

Нормальная характеристика холостого хода

I_B^*	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
E_0^*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51

средняя на основании большого количества испытанных машин. За единицу тока возбуждения принят ток I_B^* , соответствующий по характеристике холостого хода номинальному напряжению генератора ($E_0^* = U_H^* = 1$).

На рисунке 4.9 показано построение векторной диаграммы неявнополюсного насыщенного генератора при заданных значениях фазного напряжения U , тока (МДС) якоря I_a (F_a), угла нагрузки φ , активного R_a и индуктивного x_{ca} сопротивлений обмотки якоря, коэффициента приведения МДС k_a . Построение диаграммы осуществляется с учетом состояния магнитной цепи машины по характеристике холостого хода.

По величине вектора результирующей ЭДС якоря

$$\underline{E}_\delta = \underline{U} + \underline{I}_a R_a + j \underline{I}_a x_{ca}$$

и по характеристике холостого хода находят результирующую МДС возбуждения якоря $\underline{F}_{в\delta} = \underline{F}_в + k_a \underline{F}_a$. По величине вектора $\underline{F}_в = \underline{F}_{в\delta} + (-k_a \underline{F}_a)$, отложенному по оси абсцисс, находят величину вектора ЭДС возбуждения \underline{E}_0 . ЭДС \underline{E}_0 и ЭДС \underline{E}_δ ориентируются относительно МДС $\underline{F}_в$ и $\underline{F}_{в\delta}$ с отставанием на 90° .

Так определяют МДС возбуждения F_B .

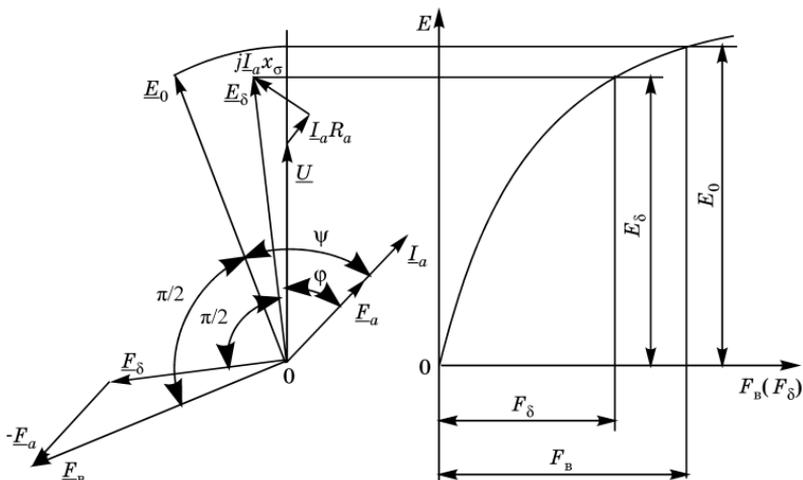


Рис. 4.9

Векторная диаграмма насыщенного неявнополюсного генератора

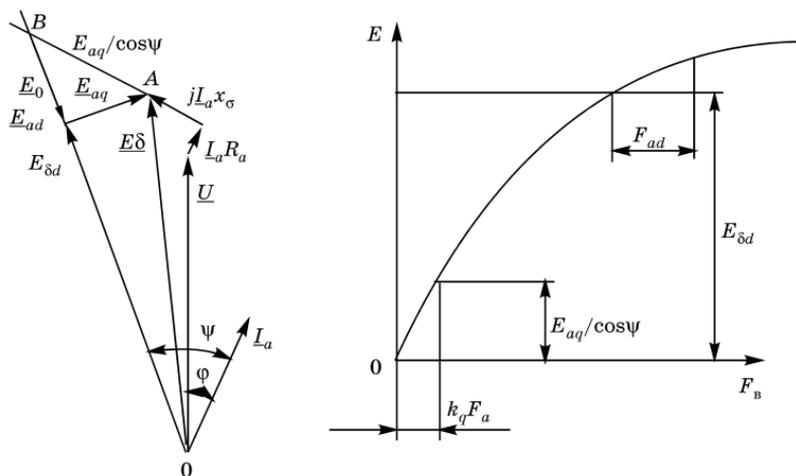


Рис. 4.10

Векторная диаграмма насыщенного явнополюсного генератора и кривая его намагничивания

Начальное построение векторной диаграммы явнополюсного насыщенного генератора (рис. 4.10) при известных значениях U , I_a , φ , R_a , $x_{\sigma a}$, k_{aq} , k_{ad} производят также, как и для неявнополюсного генератора. После построения \underline{E}_δ и определения по характеристике холостого хода $\underline{F}_{B\delta}$ необходимо учесть действие реакции якоря по осям d и q , т. е. определить МДС \underline{F}_{vd} и \underline{F}_{vq} , после чего можно построить и вектор ЭДС возбуждения \underline{E}_0 .

Для учета реакции якоря непосредственно воспользоваться формулами $F_{vd} = k_{ad}F_{ad} = k_{ad}F_a \sin\psi$ и $F_{vq} = k_{aq}F_{aq} = k_{aq}F_a \cos\psi$ не представляется возможным, так как не известно значение угла ψ между ЭДС возбуждения \underline{E}_0 и током якоря \underline{I}_a .

Определить угол ψ можно, если воспользоваться выражением $F_{vq}/\cos\psi = k_{aq}F_a$, так как величины k_{aq} и F_a известны.

По поперечной оси магнитная цепь явнополюсного генератора не насыщена (ввиду большого воздушного зазора), поэтому, отложив в начале характеристики холостого хода $k_{aq}F_a$, найдем величину отрезка $AB = E_{aq}/\cos\psi$. Точка B на диаграмме определит прямую OB , по которой будет располагаться вектор \underline{E}_0 .

Опустив перпендикуляр из точки A на линию OB , находим величину вектора \underline{E}_{aq} . Магнитное состояние цепи на оси d без учета продольной реакции якоря определяют по величине вектора ЭДС $\underline{E}_{\delta d}$ на характеристике холостого хода. По величине продольной МДС реакции якоря в масштабе обмотки возбуждения $k_{ad}F_a \sin\psi$ находят величину вектора \underline{E}_{ad} и, следовательно, величину вектора ЭДС возбуждения $\underline{E}_0 = \underline{E}_{\delta d} - \underline{E}_{ad}$.

Так определяют величину ЭДС \underline{E}_0 и необходимая для ее возбуждения МДС F_v .

4.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

О состоянии магнитной цепи и эксплуатационных свойствах автономно работающего генератора можно судить по его характеристикам холостого хода, короткого замыкания, внешней и регулировочной. Кроме того, по характеристикам холостого хода и короткого замыкания можно определить такие важные параметры генератора, как полные индуктивные сопротивления x_d и x_q и отношение короткого замыкания (ОКЗ) — параметр, характеризующий кратность установившегося тока короткого замыкания якоря при номинальном токе возбуждения.

При проведении опыта холостого хода ($I_a = 0$) снимают зависимость ЭДС возбуждения E_0 от тока возбуждения I_v при номинальной частоте вращения ротора $n_2 = n_{2н}$. По характеристике холостого хода $E_0 = f(I_v)$ судят о степени насыщения магнитной цепи генератора при различных токах возбуждения.

При опыте короткого замыкания ($U = 0$) снимают зависимость тока короткого замыкания якоря I_k от тока возбуждения I_v при $n_2 = n_{2н}$. Так как активное сопротивление обмотки якоря мало, то синхронный генератор с замкнутой накоротко обмоткой якоря представляет собой практически чисто индуктивное сопротивление. Поэтому ток I_k отстает от ЭДС E_0 на угол $\psi = 90^\circ$ и, следовательно, создает только продольную размагничивающую МДС реакции якоря F_{ad} , которой соответствуют поток реакции якоря Φ_{ad} и ЭДС реакции якоря $\underline{E}_{ad} = -jI_k x_{ad}$.

МДС возбуждения F_v и МДС реакции якоря F_{ad} направлены навстречу одна к другой, и при коротком замыкании в генераторе существует только поток рассеяния $\Phi_{\sigma a}$ и создаваемая им ЭДС $E_{\sigma a} = -jI_k x_{\sigma a}$. Поток $\Phi_{\sigma a}$ составляет 10–15% от Φ_0 , поэтому генератор ненасыщен и характеристика короткого замыкания имеет вид прямой линии, практически проходящей через начало координат.

Характеристики холостого хода и короткого замыкания генератора показаны на рисунке 4.11а. Из анализа векторной диаграммы на рисунке 4.11б следует, что

$$\underline{E}_0 = jI_k x_{ad} + jI_k x_{\sigma d} = jI_k x_d.$$

Это выражение позволяет определить синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси $x_d = E_0/I_k$, где ЭДС E_0 и ток I_k должны быть взяты на характеристиках холостого хода и короткого замыкания при одном и том же значении тока возбуждения I_v . У ненасыщенной машины, у которой зависимость $E_0 = f(I_v)$ прямая линия (рис. 4.11а), x_d — величина постоянная, при ее насыщении x_d уменьшается. Поскольку значение x_d различно для разных точек характеристики холостого хода, то практически принимается значение x_d для ненасыщенной машины.

При необходимости насыщение учитывают путем непосредственного определения ЭДС по характеристике

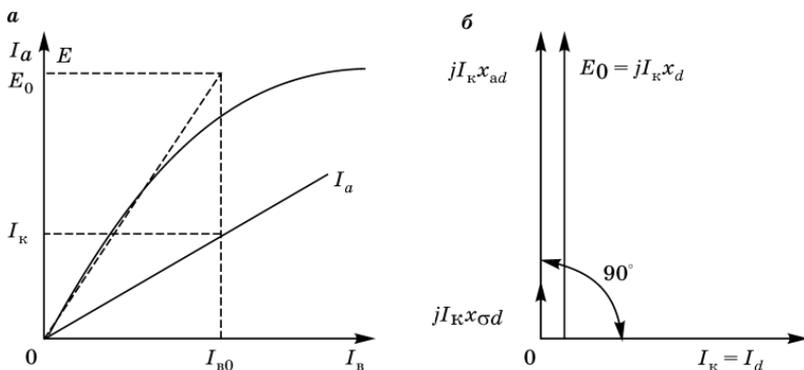


Рис. 4.11

Характеристики холостого хода и короткого замыкания (а), векторная диаграмма при коротком замыкании (б)

холостого хода. Если известны коэффициенты приведения МДС реакции якоря k_{ad} и k_{aq} , то по полученному значению x_d можно определить полное индуктивное сопротивление по поперечной оси $x_q = (k_{aq}/k_{ad})x_d$. В неявнополюсных машинах $x_d = x_q = x_a$.

Для удобства сравнения характеристик и параметров синхронных генераторов различной мощности часто используют систему относительных единиц, при этом за базу принимают номинальные величины и параметры. Если выразить синхронные индуктивные сопротивления в относительных единицах, то:

$$x_d^* = \frac{I_{ан} x_d}{U_n};$$

$$x_q^* = \frac{I_{ан} x_q}{U_n},$$

где $I_{ан}$ и U_n — номинальные значения фазного тока и напряжения.

В синхронных явнополюсных машинах средней и большой мощности $x_d^* = 0,6 - 1,6$, $x_q^* = 0,4 - 1$. В неявнополюсных машинах $x_a^* = 0,9 - 2,4$. Величина индуктивного сопротивления якорной обмотки от потоков рассеяния $x_{ca}^* = 0,1 - 0,2$.

Параметр синхронного генератора ОКЗ, который иногда указывают на паспорте генератора, представляет собой величину обратную x_d^* , $ОКЗ = 1/x_d^*$.

Этот параметр характеризует значение установившегося тока короткого замыкания $I_k = ОКЗ/I_{ан}$, который возникает при номинальном токе возбуждения, т. е. при таком токе возбуждения, при котором в режиме холостого хода индуцируется $E_0 = U_n$. Установившийся ток короткого замыкания в синхронных генераторах невелик и может быть даже меньше номинального, что объясняется размагничивающим действием реакции якоря.

Характер изменения напряжения генератора оценивают по его внешней характеристике — зависимости напряжения U от тока нагрузки I_a при постоянном токе возбуждения I_b и неизменной частоте вращения ротора n_2 .

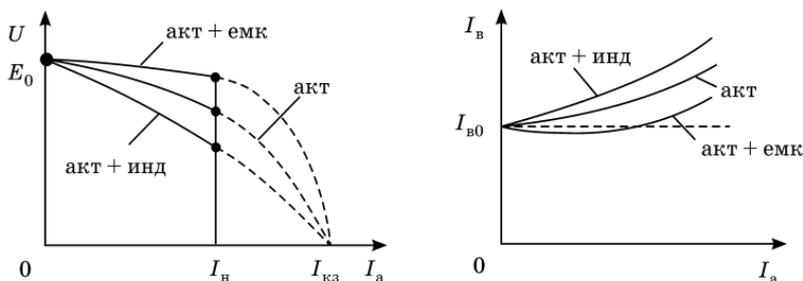


Рис. 4.12
Внешняя и регулировочная характеристики генератора

При увеличении активной нагрузки увеличивается падение напряжения на обмотке, уменьшается ЭДС из-за действия поперечной реакции якоря и, как следствие этого, уменьшается напряжение на зажимах обмотки якоря генератора. При активно-индуктивной нагрузке напряжение снижается больше из-за размагничивающего действия реакции якоря.

При активно-емкостной нагрузке напряжение вначале возрастает из-за подмагничивающего действия реакции якоря. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает снижение напряжения из-за роста падения напряжения в обмотке якоря (рис. 4.12).

При переходе от режима холостого хода к номинальной нагрузке изменение напряжения характеризуется величиной

$$\Delta u\% = \frac{U_{10} - U_{1H}}{U_{1H}} \cdot 100.$$

Для стабилизации напряжения применяют специальные устройства — быстродействующие регуляторы тока возбуждения.

Зависимости тока возбуждения I_b от тока нагрузки I_a при неизменном напряжении U и частоте вращения ротора n_2 называют *регулируемыми характеристиками* генератора. Регулируемые характеристики показывают, как надо изменять ток возбуждения, чтобы поддерживать напряжение при изменении величины и характера тока нагрузки.

4.4. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ, УГЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕНЕРАТОРА

Синхронный генератор работает на общую нагрузку параллельно с централизованной сетью. На рисунке 4.13 сеть условно представлена в виде эквивалентного генератора $G1$ большой мощности. Включение генератора на параллельную работу с сетью требует:

- равенства частот генератора и сети;
- равенства ЭДС генератора и напряжения сети ($E_0 = U_c$);
- одинакового порядка чередования фаз генератора и сети;
- нахождения в противофазе ЭДС и напряжения сети.

Во избежание уравнивательных токов, вызывающих механические удары и способных вызвать аварию, включение должно производиться в тот момент, когда ЭДС генератора (E_U, E_V, E_W) и напряжение сети (U_U, U_V, U_W) находятся строго в противофазе.

Существуют два способа включения генератора на параллельную работу — точный способ и способ самосинхронизации.

При точном способе частоту вращения приводного двигателя генератора доводят до номинальной, возбуждают генератор и устанавливают равенство между величинами ЭДС генератора и напряжением сети. Проверяется порядок чередования фаз генератора и сети, например, с помощью ламп синхронизации Л («лампового синхроскопа»), подключенных параллельно контактам ключа Q . При одинаковом чередовании фаз генератора и сети все лампы одновременно загораются и гаснут с частотой, равной разности частот сети и генератора. При разном чередовании фаз лампы загораются и гаснут не одновременно. В этом случае необходимо поменять местами между собой два провода на щитке генератора. Воздействием на приводной двигатель доводят разность частот генератора и сети до $0,1-0,2$ Гц и в момент погасания ламп и нулевого показания вольтметра замыкают ключ Q , что и означает включение генератора на параллельную работу.

При самосинхронизации невозбужденный генератор приводится во вращение и при частоте вращения $n_2 \approx n_1$

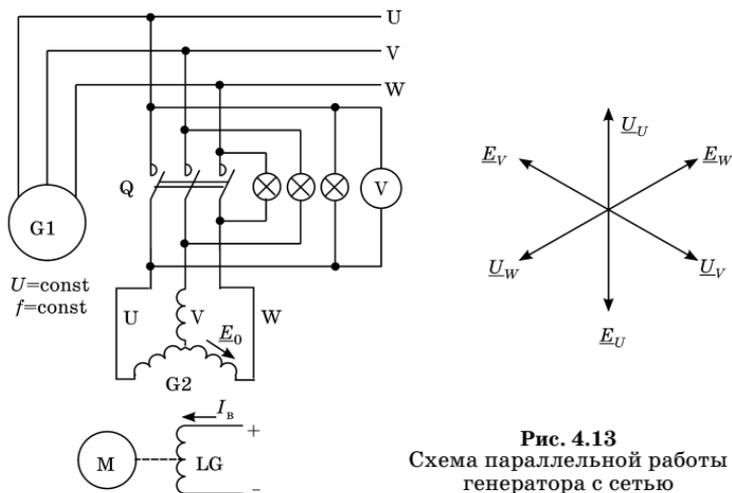


Рис. 4.13
Схема параллельной работы генератора с сетью

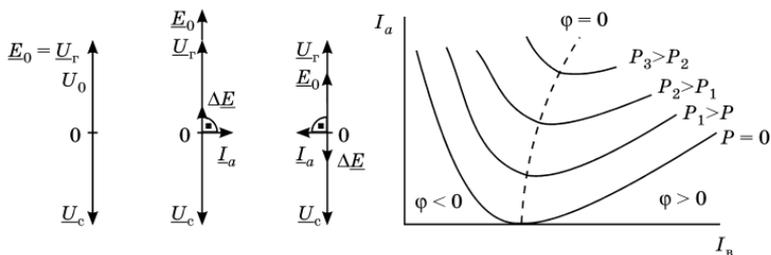


Рис. 4.14

Векторные диаграммы при нормальном возбуждении, перевозбуждении и недовозбуждении, U -образные характеристики генератора

включается в сеть. Подается ток в обмотку возбуждения и генератор втягивается в синхронный ход.

При параллельной работе генератора с сетью для изменения реактивной нагрузки на генератор воздействуют на его ток возбуждения. При увеличении тока (первозбуждение генератора) возрастает ЭДС якорной обмотки. Под действием разности ЭДС ΔE в контуре генератор — сеть потечет ток, ограниченный индуктивным сопротивлением генератора (сопротивление замещающего сеть условного генератора большой мощности принимается равным нулю).

Первозбужденный генератор по отношению к сети является емкостную нагрузку — является источником реактивной мощности (рис. 4.14). При уменьшении тока

возбуждения (недовозбуждение генератора) векторы ΔE и тока I_a в контуре генератор — сеть ориентируются по-другому. Генератор для сети является индуктивной нагрузкой — потребителем реактивной мощности.

Зависимость тока якоря от тока возбуждения называется U -образной характеристикой генератора. Штриховая линия, проведенная через минимумы токов якоря, соответствует режиму работы с $\cos\varphi = 1$. Ток возбуждения при работе генератора с $\cos\varphi = 1$ называют нормальным током возбуждения. Его смещение с ростом мощности объясняется необходимостью компенсации возрастающих полей рассеяния якорной обмотки.

Регулирование активной мощности осуществляется за счет внешнего момента, приводящего ротор в новое пространственное положение относительно оси полюса условного сетевого генератора. В результате вектор E_0 смещается относительно вектора U_r на угол θ (рис. 4.15).

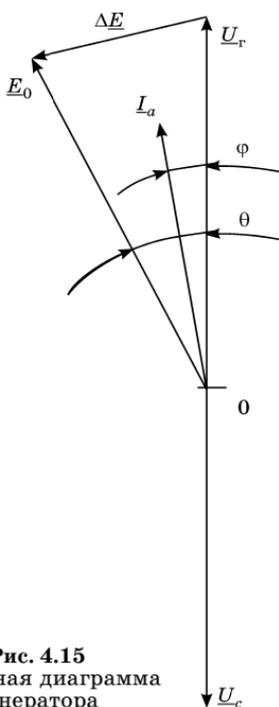


Рис. 4.15
Векторная диаграмма генератора

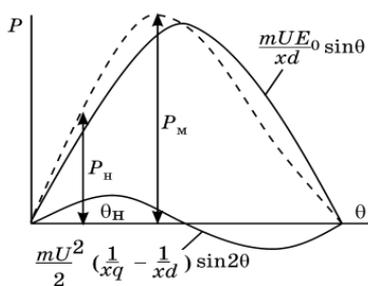


Рис. 4.16
Угловая характеристика явнополюсного генератора

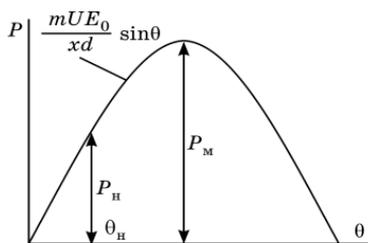


Рис. 4.17
Угловая характеристика неявнополюсного генератора

Разность ЭДС $\underline{\Delta E}$ приводит к появлению тока якоря I_a , вектор которого перпендикулярен вектору $\underline{\Delta E}$. В сеть генератор отдает активную мощность $P = mUI_a \cos \phi$, при этом на вал ротора действует тормозной момент. При равенстве вращающего и тормозного моментов частота вращения ротора вновь становится постоянной. Мощность явноплюсного генератора

$$\begin{aligned} P &= mUI_a \cos \phi = mUI_a \cos(\psi - \theta) = mUI_a \sin \psi \sin \theta + \\ &+ mUI_a \cos \psi \cos \theta = mUI_{ad} \sin \theta + mUI_{aq} \cos \theta = \\ &= mU \frac{E_0 - U \cos \theta}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{x_q} \sin \theta \cos \theta = \\ &= \frac{mUE_0}{x_d} \sin \theta + mU^2 \sin \theta \cos \theta \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) = \\ &= \frac{mUE_0}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \end{aligned}$$

Зависимость мощности от угла нагрузки $P = f(\theta)$ называется угловой характеристикой синхронного генератора (рис. 4.16). При номинальном угле нагрузки $\theta \approx 30^\circ$ перегрузочная способность генератора $P_M/P_H \approx 2$.

Момент генератора

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{mUE_0}{\omega x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Составляющую момента, обусловленную разной магнитной проводимостью генератора по осям d и q ,

$$\frac{mU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

называют реактивным моментом.

Для неявноплюсного генератора (рис. 4.17):

$$\begin{aligned} x_q &= x_d; \\ P &= \frac{mUE_0}{x_d} \sin \theta; \\ M &= \frac{mUE_0}{\omega x_d} \sin \theta. \end{aligned}$$

Согласно угловым характеристикам, каждой нагрузке соответствует свое положение угла θ . При изменении нагрузки, например, при переходе с угла θ_1 на θ_2 (рис. 4.18) новый силовой угол установится не сразу. Из-за инерции вращающихся масс переход к новому пространственному положению оси ротора будет происходить в течение времени, на протяжении которого мощность приводного двигателя будет больше мощности генератора.

На этом этапе избыточный момент вызывает положительное ускорение ротора. Ротор, дойдя до угла θ_2 , по инерции пройдет его, после чего частота вращения ротора начнет замедляться из-за отрицательного избыточного момента. Когда запасенная при прохождении от угла θ_1 до угла θ_2 кинетическая энергия ротора израсходуется на преодоление отрицательного избыточного момента, ось ротора достигнет угла θ_3 , и его частота вращения станет синхронной. Но при $\theta_3 > \theta_2$ мощность приводного двигателя меньше мощности генератора и частота вращения ротора начнет уменьшаться. Процесс, наблюдавшийся при переходе от θ_2 к θ_3 , повторится в обратном направлении, а когда ось ротора займет положение, соответствующее углу θ_1 , процесс повторится в первоначальном направлении.

Для успокоения колебаний ротора необходимы моменты, которые бы в пределах перехода оси ротора от θ_2 в сторону θ_1 действовали в сторону вращения ротора и, наоборот, в пределах перехода оси ротора от угла θ_2 в сторону θ_3 тормозили бы вращение ротора. У явнополюсных генераторов успокоительные асинхронные моменты

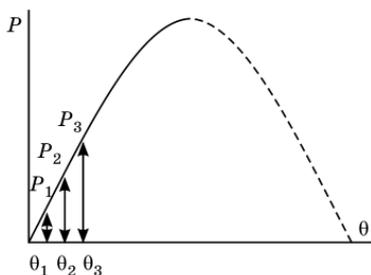


Рис. 4.18

Процесс колебания ротора

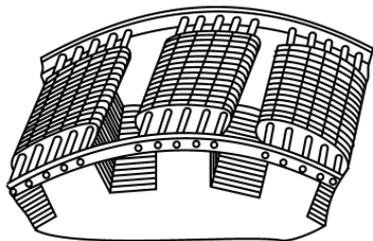


Рис. 4.19

Вид демпферной
(успокоительной) обмотки

создает располагаемая на полюсных наконечниках демпферная обмотка (рис. 4.19). У неявнополюсных генераторов роль успокоительной обмотки играет массивное тело ротора.

Большое значение успокоительная обмотка имеет и для гашения поля обратной последовательности при несимметричной нагрузке на генератор. Поток от МДС обратной последовательности наводит в успокоительной обмотке ЭДС и токи двойной частоты. МДС этих токов практически полностью уравнивает МДС обратной последовательности якорной обмотки. Обмотка возбуждения, расположенная ниже успокоительной обмотки, освобождается от токов двойной частоты, так как для нее и для ротора успокоительная обмотка является экранирующим контуром.

4.5. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ ГЕНЕРАТОРА

Встречающаяся в энергосистемах авария — внезапное короткое замыкание на линиях электропередач или шинах генераторов сопровождается большим начальным током короткого замыкания.

Процесс внезапного короткого замыкания генератора аналогичен процессу внезапного короткого замыкания трансформатора, однако вследствие вращения ротора и возникновения в его контурах переходных токов процесс внезапного короткого замыкания синхронного генератора намного сложнее. Точный анализ переходных процессов генератора, работающего в энергосистеме, представляет большие трудности. Ниже изложены элементы теории переходных процессов при симметричном трехфазном коротком замыкании генератора, работавшего без нагрузки.

В основу анализа переходных процессов положен физический смысл невозможности скачкообразного изменения потокосцепления любого контура, поэтому при внезапном коротком замыкании генератора, когда ток якоря становится практически реактивным и создает продольный размагничивающий поток, поток возбуждения,

определяющий потокосцепление обмотки возбуждения до момента короткого замыкания, должен оставаться неизменным в первый момент короткого замыкания. Это, в свою очередь, возможно в том случае, если в контурах ротора (в успокоительной обмотке и обмотке возбуждения) появятся намагничивающие токи, действие которых в точности сводится к компенсации размагничивающего действия токов короткого замыкания якоря.

Допустим наличие на роторе одного контура — обмотки возбуждения. В этом случае во время переходного процесса в обмотке якоря и в обмотке возбуждения действуют ЭДС:

- якоря $e_0 = \sqrt{2}E_0 \sin(\omega t + \psi)$, наведенная потоком, созданным током обмотки возбуждения (ψ — фаза включения обмотки якоря накоротко);
- якоря $e_{aM} = -M_{ad}(di_b/dt)$, вызванная изменением тока обмотки возбуждения в процессе короткого замыкания, где $M_{ad} = x_{ad}/\omega$ — коэффициент взаимоиндукции;
- якоря $e_{aL} = -L_d(di_a/dt)$, вызванная вращающимся полем реакции якоря и полем рассеяния якоря, где $L_d = (x_{\sigma a} + x_{ad})/\omega$ — полная индуктивность обмотки якоря по продольной оси;
- ротора $e_{bM} = -M_{ad}(di_a/dt)$, вызванная изменением магнитного поля якоря, вращающегося синхронно с ротором;
- ротора $e_{bL} = -L_b(di_b/dt)$, вызванная изменением тока возбуждения, где $L_b = (x'_{\sigma b} + x_{ad})/\omega$ — полная индуктивность обмотки возбуждения.

Поскольку активные сопротивления обмоток мало влияют на величину токов короткого замыкания, при выводе уравнений этими сопротивлениями пренебрегают. Не учитывают по этой же причине и напряжение возбудителя $u_b = i_b R_b$. С учетом этих допущений уравнения ЭДС, действующих в обмотках якоря и ротора, можно записать в таком (в умноженном на ω) виде:

$$\begin{aligned} \omega e_0 - x_{ad} \frac{di_b}{dt} - (x_{\sigma a} + x_{ad}) \frac{di_a}{dt} &= 0; \\ x_{ad} \frac{di_a}{dt} + (x'_{\sigma b} + x_{ad}) \frac{di_b}{dt} &= 0. \end{aligned}$$

Подставив из второго уравнения

$$\frac{di_B}{dt} = -\frac{x_{ad}}{(x'_{\sigma B} + x_{ad})} \frac{di_a}{dt}$$

в первое уравнение

$$\omega e_0 - \left(x_{\sigma a} + \frac{x'_{\sigma B} x_{ad}}{(x'_{\sigma B} + x_{ad})} \right) \frac{di_a}{dt} = \omega e_0 - x'_d \frac{di_a}{dt} = 0,$$

где

$$x'_d = x_{\sigma a} + \frac{x'_{\sigma B} x_{ad}}{x'_{\sigma B} + x_{ad}}$$

— переходное индуктивное сопротивление по продольной оси, и полагая, что при $t = 0$ $i_a = 0$ (короткому замыканию предшествовал холостой ход генератора), получим следующее выражение для тока короткого замыкания (без учета активных сопротивлений):

$$i_k = -\frac{\sqrt{2}E_0}{x'_d} \cos(\omega t + \psi) + \frac{\sqrt{2}E_0}{x'_d} \cos \psi = i_{кп} + i_{ка},$$

где $i_{кп}$ и $i_{ка}$ — периодическая и аperiodическая составляющие тока короткого замыкания якоря в переходном режиме.

Начальное значение аperiodического тока $i_{ка}$ зависит от фазы включения ψ . При $\psi = 0$ $i_{ка} = \sqrt{2}E_0 / x'_d$. В двух других обмотках значение тока определяется фазами включения $\psi - 2\pi/3$ и $\psi - 4\pi/3$.

При $\psi = \pi/2$ $i_{ка} = 0$ (в двух других фазных обмотках эта составляющая отлична от нуля).

Постоянные по знаку токи $i_{ка}$, протекая по фазам обмотки якоря, создают поля, неподвижные в пространстве. При вращении ротора меняется магнитная проводимость для этих полей, в зависимости от расположения оси ротора по отношению к оси соответствующей фазной обмотки якоря. Соответственно меняется значение тока $i_{ка}$ фазной обмотки при какой-то фазе включения ψ от наибольшего значения $\sqrt{2}E_0 \cos \psi / x'_d$ до наименьшего значения $\sqrt{2}E_0 \cos \psi / x'_d$, поскольку $x'_d = x_q > x'_d$. Последнее утверждение ($x'_q > x'_d$) вытекает из схем замещения синхронной

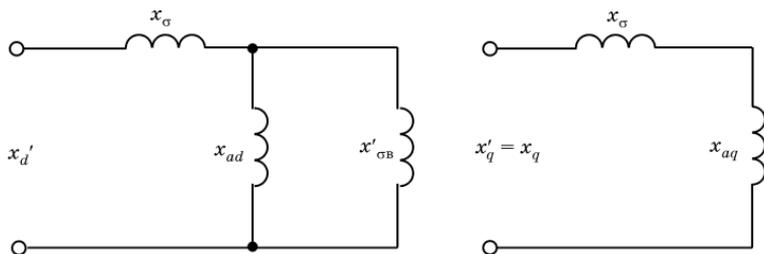


Рис. 4.20
Схемы замещения синхронной машины по осям d и q

машины в переходном режиме, приведенных на рисунке 4.20. Поскольку в переходном режиме не возникает потокосцеплений с контуром ротора по поперечной оси, то для этого режима так же, как и для установившегося, $x'_d = x_q = x_{\sigma a} + x_{\sigma q}$. Из сопоставления схем замещений и выражений, поясняющих значения x_{ad} , $x_{\sigma a}$, $x'_{\sigma в}$, видно, что $x'_q > x'_d$.

В контурах, учитывающих активные сопротивления, апериодические токи затухают. Длительность затухания определяется постоянной времени T соответствующего контура. Для обмотки возбуждения с активным сопротивлением R_B :

$$T_B = x'_B / (\omega R_B),$$

где

$$x'_B = x'_{\sigma в} + \frac{x_{\sigma a} x_{ad}}{x_{\sigma a} + x_{ad}}$$

— приведенное к якору переходное индуктивное сопротивление обмотки возбуждения.

Постоянная времени контура якоря определяется активным сопротивлением обмотки R_a и средним переходным индуктивным сопротивлением $x'_a = (x'_d + x'_q)/2$, обусловленным полем апериодического тока,

$$T_a = x'_a / (\omega R_a).$$

В соответствии с постепенным изменением индуктивного сопротивления якоря от переходного значения x'_d до установившегося значения x_d разность амплитуд перио-

дической составляющей тока (максимальной и установившейся)

$$\frac{\sqrt{2}E_0}{x'_d} - \frac{\sqrt{2}E_0}{x_d} = \sqrt{2}E_0 \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right)$$

будет уменьшаться до амплитуды $\sqrt{2}E_0/x_d$ по закону, по которому затухает свободный ток в обмотке возбуждения, т. е.

$$\sqrt{2}E_0 \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T_b}.$$

Апериодическая составляющая тока I'_a затухает с постоянной времени T_a . В конечном виде ток якоря

$$i_a = -\sqrt{2}E_0 \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T_b} \cos(\omega t + \psi) - \frac{\sqrt{2}E_0}{x_d} \cos(\omega t + \psi) + \frac{\sqrt{2}E_0}{x'_d} \cos \psi e^{-t/T_b}.$$

Периодическая и апериодическая составляющие уравнения представлены в графической форме на рисунке 4.21 для случая, когда при $t = 0$ в одной из фаз $e_0 = 0$.

На рисунке 4.21 ток $I_{уд}$ называют *ударным током* короткого замыкания. Ударный ток короткого замыкания наступает через полпериода от начала короткого замыкания. Его величина

$$I_{уд} = \frac{\sqrt{2}E_0}{x'_d} (1 + e^{-0,01/T_b}),$$

где множитель, стоящий в скобках, называют ударным коэффициентом $k_{уд}$. Обычно принимают $k_{уд} = 1,8$.

Согласно требованиям, синхронные генераторы должны выдерживать ударный ток короткого замыкания при напряжении холостого

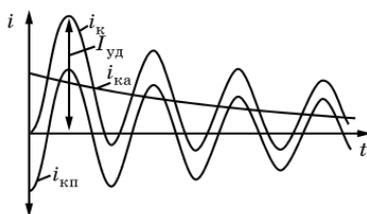


Рис. 4.21
Ток якоря при коротком замыкании

хода, равном $1,05U_n$. Если принять $E_0 = 1,05U_n$, то кратность ударного тока, представляющая его отношение к амплитуде номинального тока якоря $\sqrt{2}I_{ан}$ будет равна:

$$\frac{I_{уд}}{\sqrt{2}I_{ан}} = k_{уд} \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05U_n}{\sqrt{2}I_{ан}x'_d},$$

или в относительных единицах

$$i_{уд}^* = \frac{1,8 \cdot 1,05}{x_d^{**}}.$$

Обычно $x_d^{**} \approx 0,2 - 0,5$, и ударный ток превосходит номинальный ток в 4–10 раз.

При наличии демпферной обмотки схема замещения генератора представляет собой уже систему с тремя магнитосвязанными контурами (рис. 4.22).

Сопротивление

$$x_d'' = x_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x'_{\sigma a}} + \frac{1}{x'_{\sigma y}}}$$

называют *сверхпереходным индуктивным сопротивлением* генератора; $x_{\sigma y}$ — приведенное к статору индуктивное сопротивление рассеяния демпферной обмотки по продольной оси.

Обычно $x_d^{**} \approx 0,12 - 0,35$ и ударный ток генератора уже более чем в 5–15 раз превосходит номинальный ток якоря.

В соответствии с требованиями надежной эксплуатации генераторов ударный ток при внезапных коротких замыканиях не должен превышать амплитуду номинального тока якоря более чем в 15 раз. Для его ограничения на электростанциях иногда устанавливают специальные реакторы, включаемые в якорные цепи генераторов.

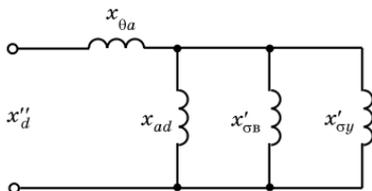


Рис. 4.22

Схема замещения генератора по оси d с демпферной обмоткой

4.6. ГЕНЕРАТОРЫ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Трехфазные синхронные генераторы составляют основу абсолютного большинства стационарных и передвижных автономных электростанций. Схема соединений генератора ДГС82/4 передвижной электростанции со схемой возбуждения от встроенного генератора постоянного тока показана на рисунке 4.23.

Схема соединений генератора синхронного генератора с самовозбуждением серии ЕСС на номинальное напряжение 230 и 400 В показана на рисунке 4.24 (ОС и ОД — основная и дополнительная обмотки статора, *LG* — обмотка возбуждения, Д — дроссель, ТНВ — трансформатор начального возбуждения).

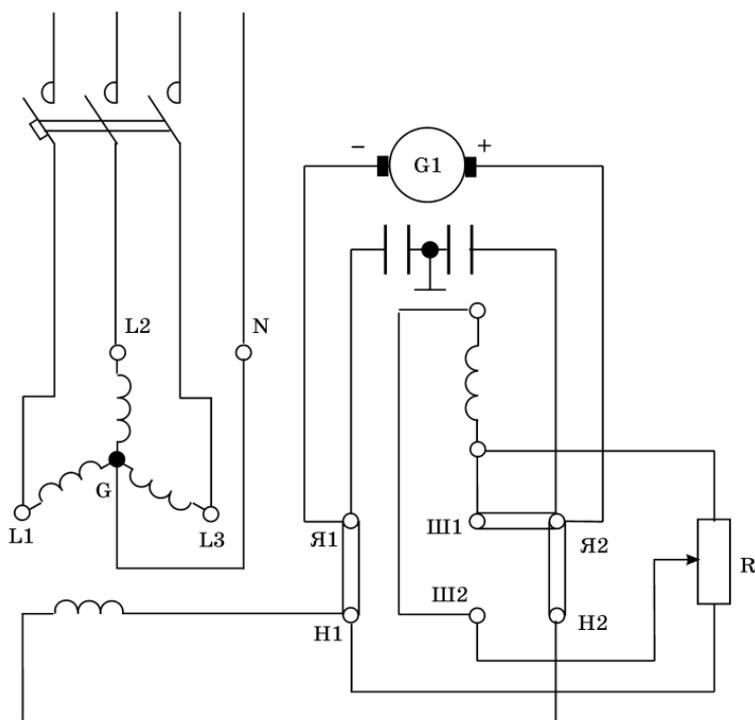


Рис. 4.23

Схема соединений синхронного генератора с возбуждением от генератора постоянного тока

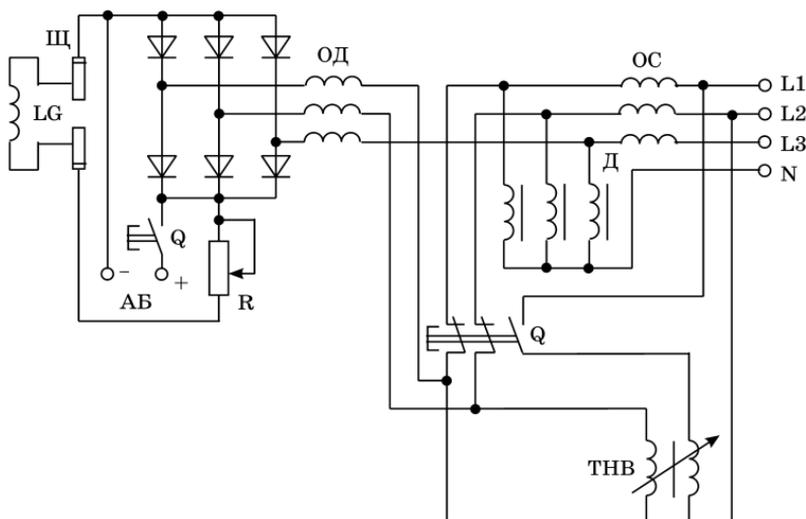


Рис. 4.24

Схема соединений генератора с самовозбуждением

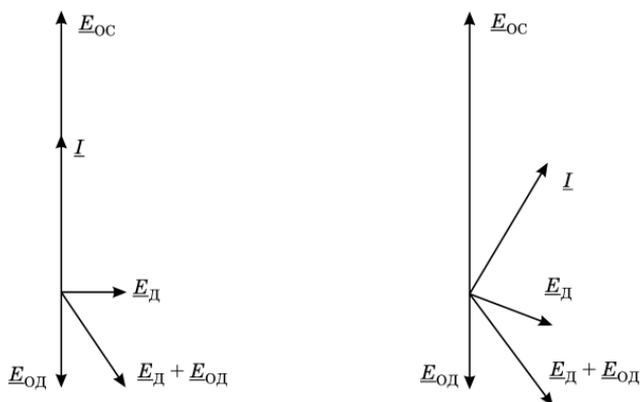


Рис. 4.25

Векторные диаграммы при активной и при активно-индуктивной нагрузке

При вращении ротора остаточный поток наводит в обмотках статора (якоря) ЭДС $E_{ост}$. При кратковременном нажатии на ключ Q (с самовозвратом) ЭДС обмотки ОС от остаточного магнитного потока увеличивается трансформатором начального возбуждения ТНВ и суммируется с

ЭДС обмотки ОД, что способствует открытию выпрямителя и появлению тока в обмотке возбуждения LG . С ростом тока возбуждения возрастает поток, ЭДС и напряжение генератора. Процесс самовозбуждения генератора завершается при пересечении вольтамперной характеристики цепи возбуждения с характеристикой намагничивания генератора. Номинальное напряжение устанавливают реостатом R в цепи возбуждения.

При отсутствии остаточного магнитного потока для его появления к зажимам на генераторе «АВ» кратковременно подключают, например, аккумуляторную батарею.

При нагрузке ЭДС дросселя D , величину которой регулируют изменением воздушного зазора дросселя, совместно с ЭДС дополнительной обмотки E_{D+OD} (рис. 4.25) поддерживают ток возбуждения, необходимый для стабилизации напряжения генератора. Таким образом, дроссель в данной схеме играет роль автоматического регулятора напряжения (АРН).

Данные генераторов приведены в таблице 4.2 (в числителе значения тока при $U_n = 230$ В, в знаменателе — при $U_n = 400$ В).

В автономных электростанциях с бесщеточным генератором возбудитель В расположен на одном валу с ротором генератора и представляет собой синхронный генератор обращенного исполнения. Его обмотка расположена на роторе, а обмотка возбуждения — на полюсах, находящихся на статоре рядом со статорной обмоткой основной машины (см. рис. 4.26).

Таблица 4.2

Технические данные генераторов ЕСС

Типоразмер генератора	P_n , кВт	S_n , кВА	I_n , А*	n_n , об/мин	η_n , %	Габарит, мм	Масса, кг
ЕСС-52-4	5	6,25	16/9	1500	80,0	180	125
ЕСС-62-4	12	15,0	38/22	1500	86,0	200	238
ЕСС-81-4	20	25,0	63/36	1500	87,0	250	349
ЕСС-82-4	30	31,5	94/54	1500	88,0	250	420
ЕСС-91-4	50	62,5	157/90	1500	90,0	315	590

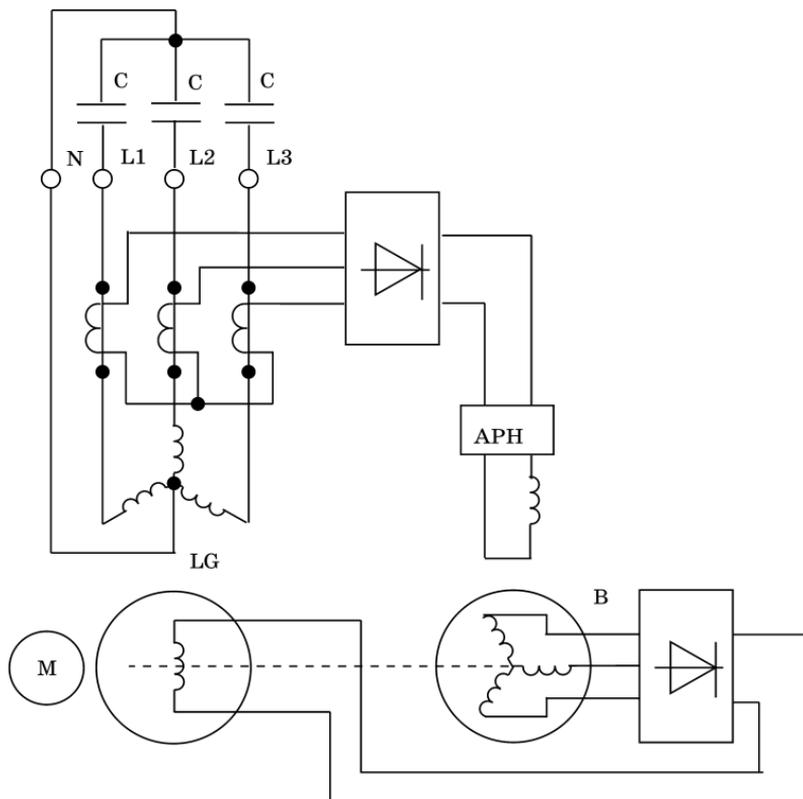


Рис. 4.26
Принципиальная схема бесщеточного генератора

Таблица 4.3

Технические данные бесщеточных генераторов серии БГ

Типоразмер генератора	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	КПД	$\cos\phi$	n_2 , об/мин
БГ8-2	8	400	14,4	80,5	0,8	3000
БГ16-2	16	400	26,9	85,0	0,8	3000
БГ16-4	16	400/230	29/50	85,0	0,8	1500
БГ30-4	30	400/230	54/93	88,5	0,8	1500
БГ60-4	60	400/230	108/189	90,5	0,8	1500
БГ75-4	75	400	136	90,0	0,8	1500
БГ100-4	100	400/230	181/314	91,0	0,8	1500

Якорь возбуждителя через вращающийся диодный выпрямитель жестко соединяется с обмоткой возбуждения генератора. Обмотка возбуждения возбуждителя питается постоянным током от автоматического регулятора напряжения (АРН). Выпрямительное устройство состоит из кремниевых диодов, соединенных по трехфазной мостовой схеме, регулируемого балластного резистора и сглаживающего конденсатора. Регулирование возбуждения генератора осуществляется регулированием тока возбуждения возбуждителя. Для обеспечения самовозбуждения генератора в пазах полюсов сердечника индуктора установлены постоянные магниты. Данные генераторов приведены в таблице 4.3.

4.7. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложен тормозной момент, переводящий ротор в пространственное положение с отрицательным углом θ (рис. 4.27). К синхронному двигателю больше применим термин напряжения сети, поэтому на векторных диаграммах и в векторных уравнениях для него принимают $\underline{U} = -\underline{U}_c$.

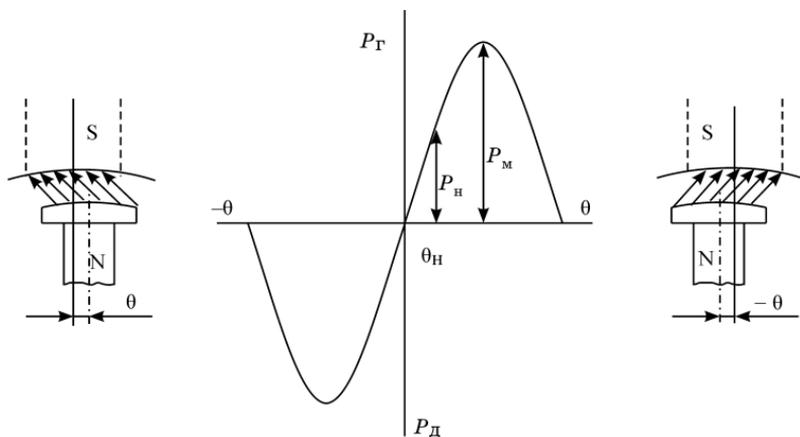


Рис. 4.27

Угловая характеристика синхронной машины
в режиме генератора и двигателя

Выводы относительно электромагнитной мощности и момента, перегрузочной способности и устойчивости, U -образных характеристик генератора справедливы и для синхронного двигателя. Некоторое отличие U -образных характеристик заключается лишь в том, что U -образная кривая двигателя при холостом ходе не касается оси абсцисс. Дело здесь в том, что мощность потерь при холостом ходе двигателя компенсируется за счет сети, и поэтому ток якоря I_a содержит некоторую активную составляющую и не может равняться нулю. У генератора потери холостого хода компенсируются первичным двигателем.

Синхронные двигатели выполняют явнополюсными на частоту вращения от 1500 до 125 об/мин. Их ценное свойство в том, что могут работать с $\cos\varphi = 1$ или с опережающим $\cos\varphi = 0,9$. Двигатели, предназначенные для работы с опережающим $\cos\varphi$, имеют большую МДС ротора. Поэтому они несколько тяжелее и дороже двигателей, работающих с $\cos\varphi = 1$, а их КПД несколько меньше.

Якорь синхронного двигателя имеет практически ту же конструкцию, что и якорь синхронного генератора. Из-за условий пуска двигателя в ход зазор синхронного двигателя выполняют относительно меньше зазора в синхронном генераторе. В полюсные наконечники ротора закладывают короткозамкнутую пусковую обмотку. Возбуждение двигателя осуществляют от выпрямителя или от возбuditеля — генератора постоянного тока. Возбудитель обычно расположен на одном валу с двигателем. В двигателях большой мощности возбудитель может располагаться и отдельно.

Способом пуска синхронного двигателя является асинхронный пуск, когда невозбужденный ротор синхронного двигателя, имеющего на полюсных наконечниках короткозамкнутую пусковую обмотку в виде неполной беличьей клетки, разбегается, как и ротор асинхронного двигателя. Процесс разбега при асинхронном пуске разбивается на два этапа — асинхронный разбег и втягивание в синхронизм после подачи возбуждения на ротор (рис. 4.28).

Под действием асинхронного момента двигатель, разбегаясь, выходит на установившийся асинхронный режим

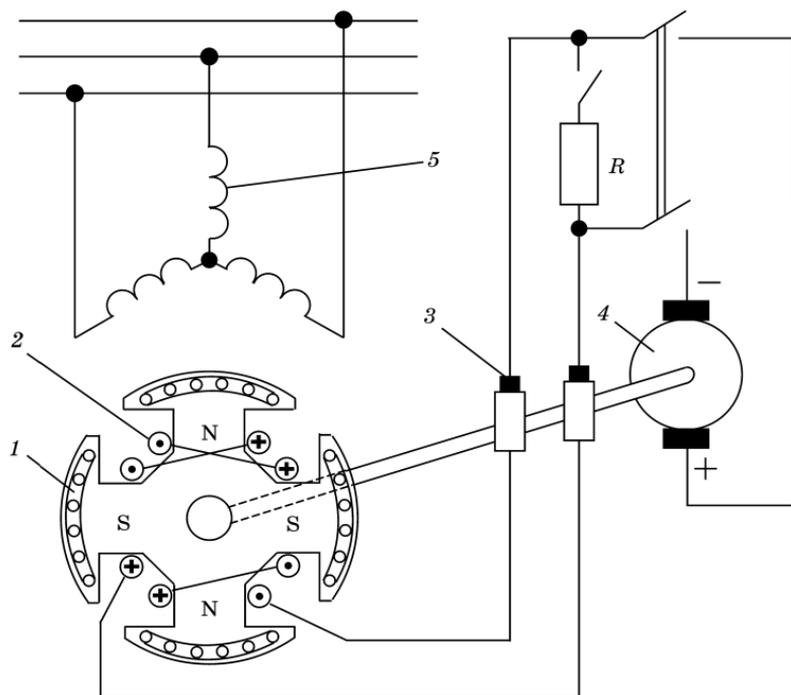


Рис. 4.28

Схема пуска синхронного двигателя:

1 — пусковая обмотка; 2 — обмотка возбуждения; 3 — контактные кольца; 4 — якорь возбудителя; 5 — обмотка статора.

вблизи синхронной частоты вращения, при этом величина скольжения s определяется условием равновесия асинхронного момента, момента сопротивления на валу и наклоном или крутизной прямолинейной части характеристики $M_{ac} = f(s)$. Крутизна прямолинейной части этой зависимости характеризуется значением асинхронного момента при скольжении $s = 0,05$. Этот момент называют *входным*, и обычно требуется, чтобы он был приблизительно равен номинальному моменту синхронного двигателя, $M_{вх} = M_n$.

На втором этапе пуска, когда частота вращения ротора достигла близкой к синхронной частоте вращения, обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока. В двигателе появляется момент, образованный

взаимодействием поля возбуждения Φ_v , вращающегося с частотой $n_2 = n_1(1 - s)$, и поля якоря Φ_a , вращающегося синхронно с частотой $n_1 = 60f_1/p$. Под его влиянием обеспечивается втягивание ротора в синхронный ход. Вхождению в синхронный ход способствует и реактивный момент явнополюсного ротора двигателя.

При асинхронном пуске в начальный момент разгона вращающееся магнитное поле якоря может привести в обмотке возбуждения при большом числе ее витков значительную ЭДС. С целью безопасности и исключения пробоя витковой изоляции обмотку возбуждения на период разгона двигателя следует замыкать. Но вместе с тем образование на роторе однофазного замкнутого контура малого активного сопротивления создает благоприятные условия для проявления эффекта Гёргеса, следовательно, двигатель при разгоне может застрять на полусинхронной частоте вращения. Для исключения этого явления обмотку возбуждения на период разбега двигателя замыкают на активное сопротивление, в 8–10 раз превышающее сопротивление обмотки возбуждения.

Синхронные двигатели сложнее и значительно дороже короткозамкнутых асинхронных двигателей. Главное их преимущество перед асинхронными двигателями заключается в возможности работать с опережающим $\cos\varphi$, тем самым разгружая сеть от реактивных токов других потребителей. Это преимущество в экономическом отношении начинает проявляться при мощности двигателя в несколько десятков киловатт. Поэтому синхронные двигатели выпускают, как правило, мощностью в сотни кВт.

Синхронные двигатели характеризуются высокой перегрузочной способностью и менее чувствительны к колебаниям напряжения сети. Их максимальный момент пропорционален напряжению, в то время как максимальный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения. Синхронные двигатели применяют в приводах крупных насосов, компрессоров и т. п.

Электрическая машина, конструктивно подобная синхронному двигателю, но для работы без нагрузки на валу с перевозбуждением, служит *синхронным компенсато-*

ром. Синхронные компенсаторы, как правило, на 6 и 8 полюсов устанавливаются в конце линии электропередачи, ближе к потребителю. Они имеют развитую магнитную систему и малый воздушный зазор для получения большей МДС возбуждения.

Синхронные двигатели малой мощности (преимущественно однофазные, рис. 4.29) от долей ватта до сотен ватт находят применение в киноустановках, радиоаппаратуре, программных устройствах, самопишущих приборах и т. д. Их выполняют без обмотки возбуждения на роторе. Если режим нагрузки постоянен, что чаще всего и наблюдается при использовании маломощных синхронных двигателей, подбором емкости конденсатора можно добиться практически кругового маг-

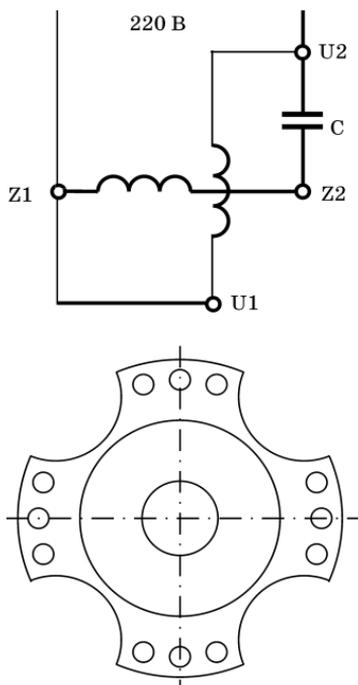


Рис. 4.29
Схема реактивного двигателя

Для обеспечения пускового момента ротор имеет пусковую короткозамкнутую обмотку из медных стержней, расположенную в пазах полюсных наконечников. Вследствие малого активного сопротивления обмотки ротор при пуске достигает почти синхронной частоты вращения, а затем под влиянием реактивного момента втягивается в синхронный ход. Роль короткозамкнутой обмотки может снова проявиться при выпадении ротора из синхронного хода из-за перегрузки двигателя. Реактивный момент двигателя с круговым полем

$$M = \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = \frac{mU_1^2}{2\omega_1 x_q} \left(1 - \frac{x_q}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Максимальное значение момента зависит от соотношения индуктивных сопротивлений x_q и x_d :

$$M_m = \frac{mU_1^2}{\omega_1 x_q} \left(1 - \frac{x_q}{x_d} \right).$$

Для реактивных двигателей $x_q/x_d \approx 0,55-0,60$. В этом случае разность $(1 - x_q/x_d) < 0,5$, что может не всегда соответствовать требованиям к перегрузочной способности двигателя. Для увеличения разности $1 - x_q/x_d$ и перегрузочной способности реактивных синхронных двигателей широко используют специальные секционированные конструкции ротора, позволяющие увеличить полюсную дугу ротора, следовательно — магнитную проводимость для продольного потока. Для обеспечения надежного пуска двигателя часть ротора также снабжается беличьей клеткой.

4.8. ИНДУКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

Индукционные системы синхронной связи служат для передачи на расстояние углового перемещения. Распространение получили два основных типа синхронной связи — синхронного вращения (электрического вала) и синхронного поворота (передачи угла). Системы электрического вала чаще осуществляют с помощью трехфазных асинхронных машин с фазным ротором. Мощность используемых в этой системе двигателей определяется величиной моментов сопротивления. В трехфазную сеть включены обмотки статоров, а обмотки ротора через сеть включены навстречу одна другой с соблюдением порядка следования фаз. В случае идентичных машин и одинакового положения осей обмоток роторов их ЭДС равны и направлены навстречу одна другой. Следовательно, тока в цепи роторов не будет.

При повороте ротора одной из машин на угол θ диаграмма ЭДС (на примере одной из фаз) ротора примет вид, изображенный на рисунке 4.30. В цепи роторов появится ток $I_2 = \Delta E_2 / (2z_2)$, где $z_2 \approx x_2$ — сопротивление фазной обмотки ротора. Угол между векторами I_2 и \underline{E}_2'' меньше 90° , а между I_2 и \underline{E}_2' больше 90° , следовательно, мощность из

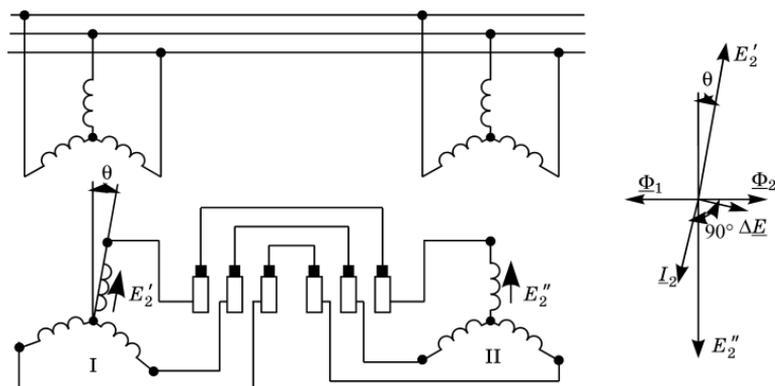


Рис. 4.30

Схема включения синхронного вала

сети, поступающая в статор машины II, передается ротором этой машины ротору машины I, а со статора этой машины она частично возвращается в сеть.

При повороте ротора одной из машин на него действует электромагнитный момент против направления поворота, а на ротор другой машины — по направлению поворота. В случае непрерывного вращения роторы машин синхронно следуют один за другим с некоторым углом рассогласования θ , соответствующим моменту на валу машины, преодолевающей момент сопротивления.

Однофазные системы синхронной передачи угла используют для дистанционного управления, регулирования или контроля и осуществляют, как правило, с помощью небольших электрических машин — *сельсинов-датчиков* и *сельсинов-приемников* (от сокращения английских слов *self-synchronizing*). В схемах автоматики используют две системы синхронной передачи угла — индикаторную и трансформаторную. Индикаторную систему применяют в тех случаях, когда на валу сельсина-приемника имеется незначительный момент сопротивления — обычно стрелка, движок реостата, поэтому для поворота ротора приемника вслед за поворотом ротора датчика требуется небольшой вращающий момент. Трансформаторную систему применяют при значительном моменте сопротивления на валу сельсина-приемника. В трансформаторной схеме

сельсин-приемник обрабатывает задаваемый сельсин-датчиком угол не самостоятельно, а с помощью связанного с ним исполнительного двигателя.

Сердечники статора и ротора сельсинов собраны из листовой электротехнической стали. По конструкции однофазные сельсины делят на контактные и бесконтактные.

В контактных сельсинах на явно выраженных полюсах статора размещается однофазная обмотка возбуждения, включаемая в сеть переменного тока. В пазах ротора уложены три соединенные в звезду обмотки, которые называют обмотками синхронизации. Три вывода соединены с контактными кольцами, по которым скользят неподвижные щетки, соединенные с внешней цепью.

Недостаток контактных сельсинов — наличие скользящих контактов, переходное сопротивление которых может значительно меняться и затруднять действие синхронной передачи.

Бесконтактный сельсин также имеет две обмотки — однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации. Обе обмотки неподвижны, поэтому отпадает необходимость в скользящих контактах. Статор 1 бесконтактного сельсина (рис. 4.31) практически такой же,

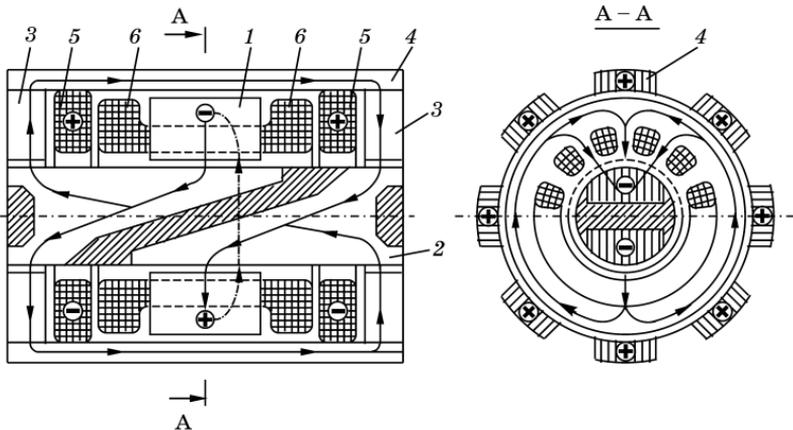


Рис. 4.31

Магнитная цепь бесконтактного сельсина:

1 — сердечник статора; 2 — ротор; 3 — торOIDы; 4 — внешний магнитопровод; 5 — обмотки возбуждения; 6 — обмотки синхронизации.

как и в любой другой асинхронной машине. В его пазах уложена соединенная в звезду трехфазная обмотка синхронизации 6. Ротор 2 имеет два полюса, разделенных немагнитным промежутком. Полюсы ротора набирают из листов электротехнической стали, располагающихся в аксиальном направлении, и крепят на оси посредством их заливки алюминием. Тороиды 3 набирают из листов электротехнической стали. К их наружной цилиндрической поверхности примыкают стержни внешнего магнитопровода 4, также набранные из листовой электротехнической стали. Стержни расположены в аксиальных пазах корпуса. С торцов корпуса расположены подшипниковые щиты.

Обмотка возбуждения 5 выполнена в виде двух катушек, имеющих форму колец. Для того чтобы поток, показанный на рисунке стрелками, замкнулся вокруг создающих его катушек обмотки возбуждения, он должен пройти из одного полюса в другой. Однако между полюсами ротора имеется большой промежуток с большим магнитным сопротивлением. Вследствие этого поток обходит этот промежуток через воздушный зазор между правым полюсом ротора и статором, а затем по зубцам, спинке статора и воздушному зазору между статором и левым полюсом ротора попадает в левый полюс ротора. Далее поток через воздушный зазор проходит в левый тороид, из которого попадает в стержни внешнего магнитопровода, правый тороид и, пройдя через воздушный зазор между правым тороидом и ротором, замыкается в правом полюсе ротора. Проходя по статору, магнитный поток сцепляется с обмоткой синхронизации. Так осуществляется магнитная связь между обмотками в бесконтактных сельсинах. Величина магнитной связи обмотки возбуждения с той или иной фазой обмотки синхронизации зависит от положения ротора.

К недостаткам бесконтактных сельсинов следует отнести сложность их конструкции.

Схема индикаторной системы синхронной связи на основе контактных сельсинов показана на рисунке 4.32. Однофазный ток обмотки возбуждения создает в каждом сельсине пульсирующее магнитное поле, которое наводит

в фазах обмотки синхронизации три ЭДС, совпадающие по фазе, но отличающиеся по величине. Если ротор сельсина-датчика повернут, например, на угол $\gamma_1 = 90^\circ + \theta/2$, а ротор приемника на угол $\gamma_2 = 90^\circ - \theta/2$, при этом разность углов $\gamma_1 - \gamma_2 = \theta$ равна углу рассогласования, то величина результирующей ЭДС и величина уравнивающего тока в соответствующих фазах обмоток синхронизации сельсинов:

$$\Delta E_A = E_2'' - E_2' = E_2(\cos \gamma_2 - \cos \gamma_1) = 2E_2 \sin \frac{\theta}{2};$$

$$\Delta E_B = \Delta E_C = -E_A / 2;$$

$$I_A = \frac{\Delta E_A}{2z_2} = \frac{E_2}{z_2} \sin \frac{\theta}{2};$$

$$I_B = I_C = -I_A / 2,$$

где z_2 — полное сопротивление фазной обмотки синхронизации.

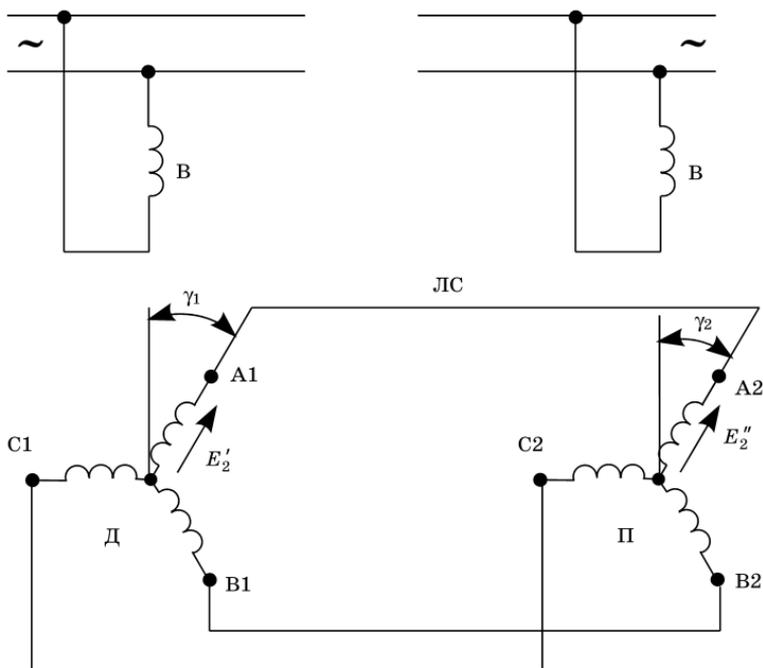


Рис. 4.32

Схема включения сельсинов в индикаторном режиме

Уравнительные токи трех обмоток синхронизации в каждой машине образуют МДС F_2 , амплитуда которой в 1,5 раза больше амплитуды МДС однофазной обмотки:

$$F_2 = \frac{3}{2} F_A = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,9 I_A w_2 k_{062}}{p} = 1,35 \cdot \frac{I_A w_2 k_{062}}{p},$$

где $w_2 k_{062}$ — эффективное число витков обмотки синхронизации.

Сельсины выполняют, как правило, двухполюсными ($p = 1$), следовательно,

$$F_2 = 1,35 \cdot \frac{I_A w_2 k_{062}}{p} = 1,35 (E_2 / z_2) w_2 k_{062} \sin \frac{\theta}{2}.$$

Если результирующие МДС F_2 сельсина-датчика и сельсина-приемника разложить на продольную F_d (вдоль оси обмотки возбуждения) и поперечную F_q (поперек оси обмотки возбуждения) составляющие, то $F_d = F_2 \sin(\theta/2)$ и $F_q = F_2 \cos(\theta/2)$. При малых углах рассогласования θ составляющей F_d можно пренебречь, поэтому практически результирующая МДС F_2 — поперечная, т. е. $F_2 = F_q$. В этом случае мгновенное взаимодействие потока обмотки возбуждения $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ с токами обмоток синхронизации равно взаимодействию этого потока с результирующим током $i_q = 1,5 i_A \cos(\theta/2)$.

Принимая в соответствии с рисунком 4.33 $i_A = \sqrt{2} I_A \times \sin(\omega t - \psi)$, находим мгновенное значение момента m ,

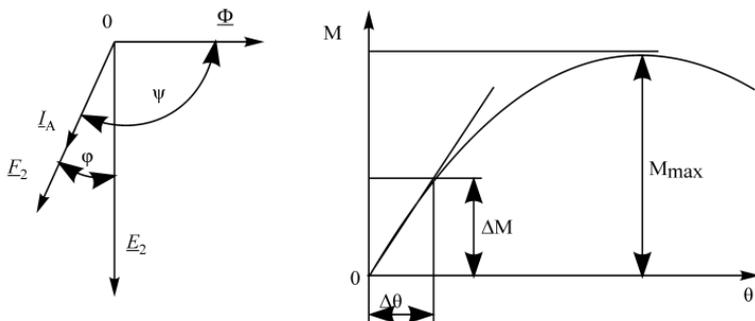


Рис. 4.33
Векторная диаграмма и зависимость сельсина-приемника от угла рассогласования

например на валу сельсина-приемника, обратного по знаку моменту на валу сельсина-датчика,

$$m = -c\Phi i_q = -\frac{3\sqrt{2}}{2}c\Phi_m I_A \cos\frac{\theta}{2} \sin(\omega t - \psi) \sin\omega t,$$

где c — конструктивная постоянная.

Средняя величина момента сельсина-приемника за период тока T :

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = -\frac{3\sqrt{2}}{2}c\Phi_m I_A \cos\psi \cos\frac{\theta}{2}.$$

Подставляя

$$I_A = \frac{E_2}{z_2} \sin\frac{\theta}{2},$$

а также поток Φ_m из выражения для трансформаторной ЭДС $E_2 = 4,44f_1w_2k_{об2}\Phi_m$, учитывая, что $\cos\psi = -\sin\varphi = -x_2/z_2$, где x_2 — индуктивное сопротивление фазной обмотки синхронизации, и принимая параметры обмотки синхронизации постоянными, момент сельсина-приемника

$$M = \frac{3\sqrt{2}}{2}c \frac{E_2}{4,44f_1w_2k_{об2}} \cdot \frac{E_2}{z_2} \sin\frac{\theta}{2} \cdot \frac{x_2}{z_2} \cdot \cos\frac{\theta}{2} = c_1 E^2 \sin\theta,$$

где c_1 — постоянная.

Зависимость $M = f(\theta)$ имеет вид синусоиды. Таким образом, при рассогласовании осей роторов однофазных сельсинов уравнительные токи образуют электромагнитные моменты, которые стремятся расположить оси роторов датчика и приемника во взаимно согласованное положение.

Качество или точность работы системы синхронной передачи определяется величиной удельного синхронизирующего момента на валу сельсина-приемника. Под удельным синхронизирующим моментом $m_{уд}$ понимают крутизну кривой момента сельсина-приемника в ее начальной части или величину

$$m_{уд} = \frac{dM}{d\theta} = c_1 E_1^2 \cos\theta \approx c_1 E_1^2,$$

так как при малых углах рассогласования $\cos\theta \approx 1$.

Чем больше $m_{уд}$, тем меньше при заданной нагрузке на валу приемника угол рассогласования между осями роторов датчика и приемника, следовательно, тем выше точность работы системы синхронной передачи.

Сельсины дают некоторые погрешности в передаче угла, которые вызваны наличием трения в подшипниках и щетках, а также определенной неточностью изготовления. В зависимости от класса точности сельсины позволяют осуществить передачу угла с погрешностью 0,25–2,5%.

В однофазных системах синхронной передачи, в которых сельсин-приемник работает в трансформаторном режиме, однофазная обмотка приемника является генераторной и в ней наводится выходная ЭДС (рис. 4.34). Величина этой ЭДС зависит от угла рассогласования между осями роторов сельсинов. За согласованное положение роторов сельсина-датчика и сельсина-приемника принимают такое, при котором оси их обмоток расположены взаимно перпендикулярно. В этом случае ЭДС в обмотке ротора приемника Π отсутствует. При повороте ротора датчика на угол θ пульсирующее поле приемника также поворачивается на угол θ . В результате этого в его одно-

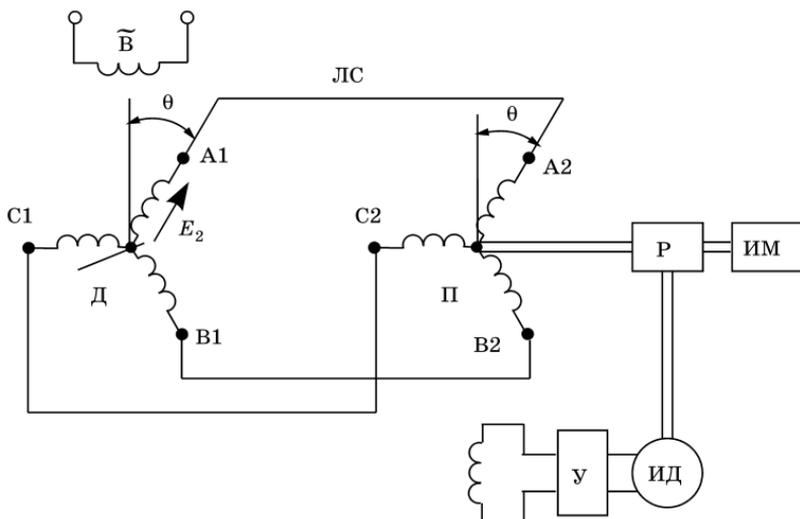


Рис. 4.34

Схема включения сельсинов в индикаторном режиме

фазной обмотке наводится ЭДС, которая через усилитель $У$ подводится к обмотке управления $ОУ$ асинхронного исполнительного двигателя ИД с обмоткой возбуждения $ОВ$, включенной через конденсатор $С$.

Исполнительный двигатель осуществляет через редуктор $Р$ согласование осей датчика и приемника, т. е. поворачивает ось ротора приемника на угол θ до полного исчезновения в его обмотке ЭДС. В результате этого исполнительный двигатель останавливается. С валом сельсина-приемника обычно механически связан какой-либо рабочий или исполнительный механизм. Основной показатель трансформаторной системы синхронной передачи — крутизна выходной ЭДС, или приращение ЭДС ΔE при изменении угла рассогласования на 1° , т. е. $\Delta E = E_\phi \sin 1^\circ = 0,0175 E_\phi$.

В случаях, когда требуется поворачивать ведомую ось на угол равный сумме или разности углов поворота двух ведущих осей, используют дифференциальный сельсин. С ведущими осями механически связаны два сельсина-датчика, а с ведомой осью — дифференциальный сельсин. Сельсины-датчики выполнены обычно, т. е. имеют однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации. Конструкция дифференциального сельсина подобна конструкции трехфазного асинхронного двигателя с обмотками на статоре и роторе. Обмотка статора присоединена к обмотке синхронизации одного датчика, обмотка ротора — к обмотке синхронизации другого датчика.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Размеры статоров, обмоточные и другие данные асинхронных двигателей: D_a — наружный диаметр статора, D — внутренний диаметр статора, l — длина статора, h — полная высота паза, h_a — высота спинки, δ — воздушный зазор, Z — число пазов статора, t — число слоев обмотки, q — число катушек в группе, y — шаг по пазам, a — число параллельных ветвей, w_k — число витков в катушке, n — число параллельных проводников, l_b — длина витка.

Таблица П.1

Размеры статора и скос пазов ротора двигателей серии АИР, мм

Типоразмер двигателя	D_a	D	l	h	h_a	δ	Z/Z_2	$b_{ск}$
АИР71А2/В2	116	63	68/ 77	11,65	14,8	0,30	24/ 17	11,4
АИР71А4/В4	116	70	72/ 78	13,8	9,2	0,20	36/ 28	6,6
АИР71А6/В6	116	78	65/ 90	11,35	7,6	0,20	36/ 28	6,6
АИР80А2/В2	131	73	78/ 102	13,36	15,7	0,30	24/ 17	9,9
АИР80А4/В4	131	86	78/ 98	11,5	11,0	0,25	36/ 28	7,8

Продолжение табл. П.1

Типоразмер двигателя	D_a	D	l	h	h_a	δ	Z/Z_2	$b_{ск}$
АИР80А6/В6	131	89	78/ 115	12,65	8,4	0,25	36/ 33	12
АИР80А8/В8	131	89	78/ 98	12,65	8,4	0,25	36/ 33	12
АИР90L2	149	82	100	15,24	18,2	0,30	24/ 17	9,9
АИР90L4	149	96	96	13,5	13,5	0,25	36/ 28	7,8
АИР90L6	149	100	110	14,15	10,4	0,25	36/ 33	12
АИР90LА8/LB8	149	104	100/ 130	14,4	8,1	0,25	36/ 33	12
АИР100S2/L2	168	89	105/ 136	18,48	21,0	0,35	24/17	9,9
АИР100S4/L4	168	104	98/ 127	16,21	15,8	0,25	36/ 28	9,4
АИР100L6	168	113	120	15,73	11,8	0,25	36/ 33	11,5
АИР100L8	168	113	100	17	10,5	0,25	48/ 44	12,2
АИР112M2	191	108	125	16,1	25,4	0,60	36/ 28	9,4
АИР112M4	191	120	125	17,3	18,2	0,30	36/ 34	10,5
АИР112МА6/МВ6	191	132	100/ 125	16,1	13,4	0,30	54/ 51	7,7
АИР112МА8/МВ8	191	132	100/ 130	18,0	11,5	0,30	48/ 44	12,2
АИР132M2	225	127	130	17,7	31,3	0,60	36/ 28	5,5
АИР132S4/M4	225	140	115/ 160	20,9	21,6	0,35	36/ 34	12,2
АИР132S6/M6	225	154	115/ 160	18,8	16,7	0,35	54/ 51	9,0
АИР132S8/M8	225	158	115/ 160	18,7	14,8	0,35	48/ 44	10,0

Продолжение табл. П.1

Типоразмер двигателя	D_a	D	l	h	h_a	δ	Z/Z_2	$b_{ск}$
АИР160S2/М2	260	140	120/ 145	24,5	35,5	0,80	36/ 28	12,2
АИР160S4/М4	260	163	150/ 180	25,8	22,7	0,50	48/ 40	10,6
АИР160S6/М6	260	180	150/ 210	21,5	18,5	0,40	54/ 44	10,5
АИР160S8/М8	260	180	150/ 210	24,5	15,5	0,40	48/ 44	11,8
АИР180S2/М2	295	155	120/ 160	28,5	41,5	1,00	36/ 28	—
АИР180S4/М4	295	190	150/ 200	27,5	25,0	0,60	48/ 40	12,4
АИР180M6/М8	295	210	195	26,0	16,5	0,45	72/ 68	9,1
АИР200M2/Л2	327	178	150/ 175	31,5	43,0	1,00	36/ 28	—
АИР200M4/Л4	327	208	195/ 235	29,0	30,5	0,70	48/ 40	11,3
АИР200M6/Л6	327	236	195/ 235	26,5	19,0	0,50	72/ 68	10,3
АИР200M8/Л8	327	236	195/ 235	26,5	19,0	0,50	72/ 68	10,3
АИР225M2	368	195	195	30,0	56,5	1,00	36/ 28	—
АИР225M4	368	235	225	30,0	33,5	0,85	48/ 40	15,4
АИР225M6/М8	368	258	200	32,0	23,0	0,60	72/ 68	11,2
АИР250S2/М2	420	218	185/ 210	37,0	64,0	1,20	48/ 40	—
АИР250S4/М4	420	273	230/ 255	38,0	35,5	1,00	60/ 50	14,3
АИР250S6/М6	420	297	190/ 215	33,0	28,5	0,70	72/ 56	12,9
АИР250S8М8	420	297	190/ 215	33,0	28,5	0,70	72/ 56	12,9

Таблица П.2

Обмоточные данные двигателей серии АИР

Типоразмер двигателя	P_{300} , кВт	Z	t	q	y	a	w_k	n	d, мм	l_n , см	G, кг
<u>АИР71А2</u> АИР71В2	<u>0,75</u> 1,1	24	1	2	1-12 2-11	1	<u>78</u> 66	1	<u>0,60</u> 0,63	<u>41</u> 43	<u>1,0</u> 1,1
<u>АИР71А4</u> АИР71В4	<u>0,55</u> 0,75	36	1	3	1-12 2-11 3-10	1	<u>87</u> 69	1	<u>0,53</u> 0,60	<u>34</u> 37	<u>0,9</u> 1,0
<u>АИР71А6</u> АИР71В6	<u>0,37</u> 0,55	36	1	2	1-8 2-7	1	<u>110</u> 86	1	<u>0,425</u> 0,50	<u>28</u> 33	<u>0,8</u> 1,0
АИР71В8	0,25	36	1	2 и 1	1-6 2-5 1-6	1	132	1	0,40	30	0,9
<u>АИР80А2</u> АИР80В2	<u>1,5</u> 2,2	24	1	2	1-12 2-11	1	<u>61</u> 50	2	<u>0,80</u> 0,90	<u>49</u> 54	<u>1,7</u> 1,9
<u>АИР80А4</u> АИР80В4	<u>1,1</u> 1,5	36	1	3	1-12 2-11 3-10	1	<u>60</u> 50	1	<u>0,63</u> 0,71	<u>38</u> 42	<u>1,2</u> 1,4
<u>АИР80А6</u> АИР80В6	<u>0,75</u> 1,1	36	1	2	1-8 2-7	1	<u>78</u> 57	1	<u>0,56</u> 0,71	<u>35</u> 42	<u>1,1</u> 1,6
<u>АИР80А8</u> АИР80В8	<u>0,37</u> 0,55	36	1	2 и 1	1-6 2-5 1-6	1	<u>100</u> 80	1	<u>0,50</u> 0,56	<u>35</u> 38	<u>1,1</u> 1,2
АИР90L2	3,0	24	1	2	1-12 2-11	1	42	1	1,12	58	2,6
АИР90L4	2,2	36	1	3	1-12 2-11 3-10	1	41	1	0,85	43	1,6
АИР90L6	1,5	36	1	2	1-8 2-7	1	52	1	0,80	39	1,7
<u>АИР90LА8</u> АИР90LВ8	<u>0,75</u> 1,1	48	1	2	1-8 2-7	1	<u>68</u> 51	1	<u>0,63</u> 0,75	<u>36</u> 42	<u>1,5</u> 1,7
<u>АИР100S2</u> АИР100L2	<u>4,0</u> 5,5	24	1	2	1-12 2-11	1	<u>37</u> 30	2	<u>1,0</u> 1,12	<u>61</u> 67	<u>3,9</u> 4,5
<u>АИР100S4</u> АИР100L4	<u>3,0</u> 4,0	36	1	3	1-12 2-11 3-10	1	<u>38</u> 29	1	<u>1,12</u> 1,32	<u>49</u> 54	<u>3,0</u> 3,5
АИР100L6	2,2	36	1	2	1-8 2-7	1	42	1	1,06	43	2,6
АИР100L8	1,5	48	1	2	1-8 2-7	1	50	1	0,85	42	2,5
АИР112М2	7,5	36	1	3	1-18 2-17 3-16	1	18	2	1,25	70	5,1

Продолжение табл. П.2

Типоразмер двигателя	$P_{\text{эл}},$ кВт	Z	t	q	y	a	w_k	n	$d,$ мм	$l_n,$ см	$G,$ кг
АИР112М4	5,5	36	1	2 и 1	1-10 2-9 2-9	1	26	2	1,06	51	3,9
<u>АИР112МА6</u> <u>АИР112МВ6</u>	<u>3,0</u> 4,0	54	1	2 и 1	1-10 2-9 2-9	1	<u>28</u> 24	1	<u>1,12</u> 1,25	<u>43</u> 48	<u>2,9</u> 3,7
<u>АИР112МА8</u> <u>АИР112МВ8</u>	<u>2,2</u> 3,0	48	1	2	1-8 2-7	1	40 31	1	<u>1,06</u> 1,18	<u>41</u> 47	<u>3,2</u> 3,5
АИР132М2	11	36	1	3	1-18 2-17 3-16	2	29	2	1,12	78	7,3
<u>АИР132S4</u> <u>АИР132М4</u>	<u>7,5</u> 11	36	1	2 и 1	1-10 2-9 2-9	$\frac{1}{2}$	<u>23</u> 33	2	<u>1,32</u> 1,12	<u>55</u> 64	<u>5,7</u> 6,9
<u>АИР132S6</u> <u>АИР132М6</u>	<u>5,5</u> 7,5	54	1	2 и 1	1-10 2-9 2-9	1	<u>21</u> 15	2	<u>1,06</u> 1,25	<u>48</u> 57	<u>4,5</u> 5,2
<u>АИР132S8</u> <u>АИР132М8</u>	<u>4,0</u> 5,5	48	1	2	1-8 2-7	1	<u>28</u> 21	$\frac{1}{2}$	<u>1,4</u> 1,12	<u>46</u> 55	<u>4,3</u> 5
<u>АИР160S2</u> <u>АИР160М2</u>	<u>15</u> 18,5	36	2	6	1-14	2	<u>15 и 16</u> 12 и 13	2	<u>1,32</u> 1,5	<u>77</u> 82	<u>11</u> 12
АИР160S4	15	48	2	4	1-11	2	13	1 + 1	1,32 1,4	67	11
АИР160М4	18,5	48	2	4	1-11	1	5 и 6	3 + 1	1,4 1,5	73	12
<u>АИР160S6</u> <u>АИР160М6</u>	<u>11</u> 15	54	1	2 и 1	1-10 2-9 2-9	$\frac{1}{3}$	<u>14</u> 31	$\frac{2}{2}$	<u>1,5</u> 1,0	<u>62</u> 75	<u>7,5</u> 9
<u>АИР160S8</u> <u>АИР160М8</u>	<u>7,5</u> 11	48	1	2	1-8 2-7	1	<u>20</u> 14	3	<u>1,18</u> 1,4	<u>61</u> 73	<u>8,6</u> 10
АИР180S2	22	36	2	6	1-13	2	12 и 13	2 + 1	1,32 1,4	74	13
АИР180М2	30	36	2	6	1-13	2	10	3	1,5	83	14
АИР180S4	22	48	2	4	1-11	2	11 и 12	2	1,6	73	15
АИР180М4	30	48	2	4	1-11	2	8 и 9	1 + 3	1,25 1,32	83	16
АИР180М6	18,5	72	2	4	1-11	2	8 и 9	1 + 1	1,4 1,5	74	14

Продолжение табл. П.2

Типоразмер двигателя	$P_{2н}$, кВт	Z	t	q	y	a	w_k	n	d , мм	l_n , см	G , кг
АИР180М8	15	72	2	3	1-8	2	11	1+1	1,25 1,32	68	13
АИР200М2	37	36	2	6	1-12	2	10	2+2	1,5 1,6	95	24
АИР200L2	45	36	2	6	1-12	2	8 и 9	5	1,5	99	25
АИР200М4 АИР200L4	$\frac{37}{45}$	48	2	4	1-11	2	$\frac{7 \text{ и } 8}{6 \text{ и } 7}$	$\frac{6}{4}$	$\frac{1,18}{1,6}$	$\frac{88}{96}$	$\frac{19}{22}$
АИР200М6	22	72	2	4	1-11	3	12	2	1,32	78	17
АИР200L6	30	72	2	4	1-11	3	10	1+1	1,4 1,5	84	19
АИР200М8	18,5	72	2	3	1-8	4	19	1	1,5	70	16
АИР200L8	22	72	2	3	1-8	4	17	1+1	1,06 1,12	76	18
АИР225М2	55	36	2	6	1-12	2	7 и 8	5	1,6	105	26
АИР225М4	55	48	2	4	1-11	4	$\frac{12 \text{ и } 13}{13}$	3	1,5	102	30
АИР225М6	37	72	2	4	1-11	3	8 и 9	2+1	1,32 1,4	85	21
АИР225М8	30	72	2	3	1-8	2	7	3+1	1,25 1,32	78	18
АИР250S2 АИР250М2	$\frac{75}{90}$	48	2	8	1-15	2	$\frac{5}{4 \text{ и } 5}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{1,6}{1,6}$	$\frac{108}{113}$	$\frac{38}{40}$
АИР250S4 АИР250М4	$\frac{75}{90}$	60	2	5	1-13	4	$\frac{9}{8}$	6	$\frac{1,32}{1,4}$	$\frac{102}{107}$	$\frac{41}{43}$
АИР250S6 АИР250М6	$\frac{45}{55}$	72	2	4	1-11	3	$\frac{8 \text{ и } 9}{7 \text{ и } 8}$	4	$\frac{1,32}{1,4}$	$\frac{82}{87}$	$\frac{25}{27}$
АИР250S8 АИР250М8	$\frac{37}{45}$	72	2	3	1-8	4	$\frac{14}{12}$	2	$\frac{1,5}{1,6}$	$\frac{73}{78}$	$\frac{24}{25}$

Таблица П.3

Значение коэффициента воздушного зазора k_s

h p	71	80	90	100	112	132	160	180-250
$p = 1$	1,19	1,28	1,25	1,23	1,20	1,18	1,20	1,21
$p = 2$	1,20	1,36	1,40	1,32	1,38	1,29	1,31	1,32
$p = 3$	1,30	1,34	1,32	1,35	1,49	1,44	1,32	1,33
$p = 4$	1,30	1,34	1,32	1,35	1,41	1,38	1,33	1,31

Таблица П.4

Значение коэффициента насыщения магнитной цепи k_m

$p \backslash h$	71	80	90	100	112	132	160	180-250
$p = 1$	1,37	1,68	1,51	1,53	1,75	1,57	1,50	1,54
$p = 2$	1,46	1,52	1,49	1,52	1,46	1,51	1,44	1,48
$p = 3$	1,32	1,28	1,31	1,29	1,33	1,32	1,31	1,33
$p = 4$	1,23	1,16	1,29	1,25	1,25	1,23	1,22	1,27

Таблица П.5

Значение индукции в воздушном зазоре B_g (Тл)

$p \backslash h$	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250
$p = 1$	0,77	0,75	0,75	0,74	0,71	0,72	0,73	0,85	0,81	0,74	0,81
	0,80	0,69	—	0,71	—	—	0,73	0,81	0,81	—	0,79
$p = 2$	0,88	0,83	0,85	0,89	0,86	0,90	0,83	0,80	0,86	0,80	0,76
	0,88	0,80	—	0,88	—	0,90	0,81	0,81	0,82	—	0,76
$p = 3$	0,87	0,90	0,85	0,86	0,85	0,85	0,85	0,76	0,72	0,89	0,82
	0,81	0,84	—	—	0,82	0,88	0,87	—	0,76	—	0,84
$p = 4$	0,77	0,90	0,70	0,85	0,90	0,94	0,90	0,79	0,77	0,88	0,89
	0,77	0,90	0,72	—	0,90	0,92	0,90	—	0,76	—	0,89

Таблица П.6

Значение линейной нагрузки A (А/см)

$p \backslash h$	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250
$p = 1$	170	210	—	250	280	245	360	400	450	435	470
	200	240	240	275	—	—	350	415	450	—	480
$p = 2$	230	220	—	280	270	285	345	390	375	365	320
	215	225	245	270	—	300	355	390	390	—	390
$p = 3$	210	225	—	—	270	270	305	345	350	365	380
	210	230	245	235	270	275	305	—	375	—	400
$p = 4$	205	205	225	—	285	285	295	370	360	385	420
	170	210	—	250	280	245	360	400	450	435	470

Таблица П.7

Составляющие потерь в двигателях, Вт

Типоразмер двигателя	$P_{эл1}$	P_c	P_m	$P_{эл2}$	P_d
<u>АИР71А2</u> АИР71В2	<u>100</u> 128	<u>50</u> 60	<u>24</u> 28	<u>60</u> 70	<u>6</u> 8
<u>АИР71А4</u> АИР71В4	<u>127</u> 160	<u>48</u> 56	<u>4</u> 5	<u>50</u> 65	<u>4</u> 6
<u>АИР71А6</u> АИР71В6	<u>132</u> 176	<u>37</u> 54	<u>2</u> 3	<u>38</u> 51	<u>3</u> 5
АИР71В8	157	33	1	25	3
<u>АИР80А2</u> АИР80В2	<u>165</u> 210	<u>78</u> 98	<u>30</u> 34	<u>72</u> 103	<u>10</u> 14
<u>АИР80А4</u> АИР80В4	<u>201</u> 250	<u>67</u> 80	<u>7</u> 9	<u>65</u> 72	<u>8</u> 10
<u>АИР80А6</u> АИР80В6	<u>201</u> 224	<u>56</u> 76	<u>3</u> 4	<u>69</u> 97	<u>6</u> 8
<u>АИР80А8</u> АИР80В8	<u>152</u> 217	<u>36</u> 50	<u>2</u> 3	<u>34</u> 42	<u>3</u> 4
АИР90L2	270	110	50	145	20
АИР90L4	290	105	16	110	13
АИР90L6	274	90	5	104	10
<u>АИР90LА8</u> АИР90LВ8	<u>272</u> 307	<u>69</u> 77	<u>3</u> 4	<u>146</u> 180	<u>5</u> 8
<u>АИР100S2</u> АИР100L2	<u>225</u> 300	<u>155</u> 180	<u>75</u> 79	<u>135</u> 178	<u>23</u> 31
<u>АИР100S4</u> АИР100L4	<u>320</u> 342	<u>145</u> 165	<u>18</u> 21	<u>146</u> 165	<u>18</u> 24
АИР100L6	288	126	8	118	14
АИР100L8	308	103	6	91	10
АИР112M2	402	274	121	208	43
АИР112M4	465	206	30	180	33
<u>АИР112МА6</u> АИР112МВ6	<u>403</u> 482	<u>162</u> 192	<u>13</u> 16	<u>148</u> 211	<u>19</u> 24
<u>АИР112МА8</u> АИР112МВ8	<u>392</u> 449	<u>146</u> 176	<u>7</u> 9	<u>132</u> 195	<u>15</u> 20
<u>АИР132S4</u> АИР132M4	<u>510</u> 642	<u>293</u> 400	<u>38</u> 43	<u>216</u> 313	<u>44</u> 61
<u>АИР132S6</u> АИР132M6	<u>585</u> 667	<u>250</u> 320	<u>26</u> 31	<u>220</u> 300	<u>34</u> 45
<u>АИР132S8</u> АИР132M8	<u>524</u> 673	<u>295</u> 272	<u>14</u> 17	<u>167</u> 260	<u>25</u> 34
АИР132M2	595	365	155	270	63

Продолжение табл. П.7

Типоразмер двигателя	$P_{эл1}$	P_c	P_m	$P_{эл2}$	P_d
<u>АИР160S2</u> АИР160M2	<u>665</u> 735	<u>320</u> 325	<u>310</u> 360	<u>475</u> 475	<u>85</u> 105
<u>АИР160S4</u> АИР160M4	<u>655</u> 805	<u>420</u> 500	<u>100</u> 120	<u>380</u> 460	<u>85</u> 105
<u>АИР160S6</u> АИР160M6	<u>730</u> 850	<u>395</u> 535	<u>55</u> 70	<u>340</u> 480	<u>65</u> 85
<u>АИР160S8</u> АИР160M8	<u>565</u> 740	<u>245</u> 350	<u>25</u> 35	<u>240</u> 365	<u>45</u> 65
<u>АИР180S2</u> АИР180M2	<u>890</u> 935	<u>380</u> 555	<u>440</u> 540	<u>510</u> 670	<u>125</u> 165
<u>АИР180S4</u> АИР180M4	<u>1130</u> 1155	<u>410</u> 560	<u>160</u> 195	<u>530</u> 610	<u>125</u> 165
АИР180M6	1130	860	60	405	105
АИР180M8	935	390	40	375	85
<u>АИР200M2</u> АИР200L2	<u>1180</u> 1255	<u>695</u> 760	<u>650</u> 795	<u>710</u> 860	<u>205</u> 245
<u>АИР200M4</u> АИР200L4	<u>1190</u> 1405	<u>625</u> 740	<u>245</u> 320	<u>645</u> 805	<u>200</u> 245
<u>АИР200M6</u> АИР200L6	<u>1195</u> 1535	<u>690</u> 810	<u>90</u> 110	<u>440</u> 665	<u>125</u> 170
<u>АИР200M8</u> АИР200L8	<u>1170</u> 1335	<u>405</u> 450	<u>75</u> 60	<u>420</u> 530	<u>105</u> 125
АИР225M2	1585	655	810	1100	300
АИР225M4	1590	675	280	905	295
АИР225M6	1580	775	130	730	205
АИР225M8	1515	505	70	665	165

Таблица П.8

Размеры статоров двигателей серии 4А, мм

Типоразмер двигателя	D_a	D	l	h	h_a	δ
4АА50А2/В2	81	41	42/42	10,1	9,9	0,25
4АА50А4/В4	81	46	42/42	11,5	6	0,25
4АА56А2/В2	89	48	47/56	8,5	12	0,25
4АА56А4/В4	89	55	47/56	10,3	6,7	0,25
4АА63А2/В2	100	54	56/65	9,5	13,5	0,30
4АА63А4/В4	100	61	56/65	10,9	8,6	0,25
4АА63А6/В6	100	65	56/75	11,4	6,1	0,25

Продолжение табл. П.8

Типоразмер двигателя	D_a	D	l	h	h_a	δ
4A71A2/B2	116	65	65/74	9,8	15,7	0,35
4A71A4/B4	116	70	65/74	12,1	10,9	0,25
4A71A6/B6	116	76	65/90	12,7	7,3	0,25
4A71B8	116	76	74	12,7	7,3	0,25
4A80A2/B2	131	74	78/98	12,1	16,4	0,35
4A80A4/B4	131	84	78/98	12,6	10,9	0,25
4A80A6/B6	131	88	78/115	13,6	8,0	0,25
4A80A8/B8	131	88	78/98	13,5	8,0	0,25
4A90L2	149	84	100	13,1	19,4	0,40
4A90L4	149	95	100	13,4	13,6	0,40
4A90L6	149	100	110	14,3	10,2	0,25
4A90LA8/LB8	149	104	110/130	14,3	10,2	0,25
4A100S2/L2	163	95	100/130	14,6	16,9	0,45
4A100S4/L4	168	105	100/130	16,3	15,2	0,30
4A100L6/L8	168	113	110/120	15,9	11,6	0,30
4A112M2	191	110	125	15,6	24,9	0,60
4A112M4	191	126	125	14,8	17,7	0,30
4A112MA6/MB6	191	132	100/130	16,1	13,4	0,30
4A112MA8/MB8	191	132	100/130	18,0	11,5	0,30
4A132M2	225	130	130	16,9	30,6	0,60
4A200M8/L8	349	250	160/185	26,7	22,8	0,50
4A132S4/M4	225	145	115/160	18,7	21,3	0,35
4A132S6/M6	225	158	115/160	16,9	16,6	0,35
4A132S8/M8	225	158	115/160	18,5	15,0	0,35
4A160S2/M2	272	155	110/130	21	37,5	0,80
4A160S4/M4	272	185	130/170	21,5	22,0	0,50
4A160S6/M6	272	197	145/200	19,8	17,7	0,45
4A160S8/M8	272	197	145/200	20,1	17,4	0,45
4A180S2/M2	313	171	110/145	25,7	45,3	1,0
4A180S4/M4	313	211	145/185	25,0	26,0	0,60

Продолжение табл. П.8

Типоразмер двигателя	D_a	D	l	h	h_a	δ
4A180M6/M8	313	220	145/170	27,5	19,0	0,50
4A200M2/L2	349	194	130/160	29,2	48,3	0,90
4A200M4/L4	349	238	170/215	25,5	30,2	0,70
4A200M6/L6	349	250	160/185	26,7	22,8	0,50
4A225M2	392	208	180	30,2	61,8	1,00
4A225M4	392	264	200	28,0	36,0	0,85
4A225M6/M8	392	284	175	28,6	25,4	0,60
4A250S2/M2	437	232	190/220	33,3	69,2	1,2
4A250S4/M4	437	290	220/260	35,0	38,5	1,0
4A250S6/M6	437	317	180/200	29,6	30,4	0,70
4A250S8/M8	437	317	180/220	29,6	30,4	0,70
4AH160S2/M2	272	155	110/150	21	37,5	0,80
4AH160S4/M4	272	185	130/170	21,5	22,0	0,50
4AH180S2/M2	313	171	110/145	25,7	45,3	1,0
4AH180S4/M4	313	211	145/185	25,0	26,0	0,60
4AH180S6/M6	313	220	130/170	27,5	19,0	0,50
4AH180S8/M8	313	220	170/220	27,5	19,0	0,50
4AH200M2/L2	349	194	160/200	29,2	48,3	0,90
4AH200M4/L4	349	238	170/215	25,5	30,2	0,70
4AH200M6/L6	349	250	160/215	26,7	22,8	0,50
4AH200M8/L8	349	250	185/265	26,7	22,8	0,50
4AH225M2	392	208	180	30,2	61,8	1,0
4AH225M4	392	264	200	28,0	36,0	0,85
4AH225M6	392	284	175/210	28,6	25,4	0,60
4AH225M8	392	284	175/210	28,6	25,4	0,60
4AH250S2/M2	437	232	190/220	33,3	69,2	1,2
4AH250S4/M4	437	290	200/220	35,0	38,5	1,0
4AH250S6/M6	437	317	180/240	29,6	30,4	0,70
4AH250S8/M8	437	317	200/240	29,6	30,4	0,70

Таблица П.9

Обмоточные данные двигателей серии 4А

Типоразмер двигателя	$P_{\text{выс}}$ кВт	Z	t	q	ν	α	w_k	n	d, мм	$l_{\text{вн}}$, см	G, кг
4АА50А2 4АА50В2	$\frac{0,09}{0,12}$	12	1	1	1-6	$\frac{1}{1}$	$\frac{450}{394}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,27}{0,31}$	$\frac{24}{24}$	$\frac{0,30}{0,34}$
4АА50А4 4АА50В4	$\frac{0,06}{0,09}$	24	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{635}{500}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,27}{0,31}$	$\frac{27}{27}$	$\frac{0,37}{0,39}$
4АА56А2 4АА56В2	$\frac{0,18}{0,25}$	24	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{160}{140}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,30}{0,335}$	$\frac{31}{33}$	$\frac{0,43}{0,48}$
4АА56А4 4АА56В4	$\frac{0,12}{0,18}$	24	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{246}{200}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,30}{0,335}$	$\frac{26}{28}$	$\frac{0,51}{0,56}$
4АА63А2 4АА63В2	$\frac{0,37}{0,55}$	24	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{126}{100}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,38}{0,45}$	$\frac{30}{35}$	$\frac{0,56}{0,65}$
4АА63А4 4АА63В4	$\frac{0,25}{0,37}$	24	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{168}{134}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,38}{0,45}$	$\frac{28}{29}$	$\frac{0,61}{0,63}$
4АА63А6 4АА63В6	$\frac{0,18}{0,25}$	24	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{167}{130}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,335}{0,40}$	$\frac{25}{28}$	$\frac{0,62}{0,83}$
4А71А2 4А71В2	$\frac{0,75}{1,1}$	24	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{89}{71}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,53}{0,56}$	$\frac{42}{44}$	$\frac{0,91}{0,90}$
4А71А4 4А71В4	$\frac{0,55}{0,75}$	24	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{113}{95}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,53}{0,56}$	$\frac{34}{36}$	$\frac{0,92}{0,95}$
4А71А6 4А71В6	$\frac{0,37}{0,55}$	36	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{114}{85}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,45}{0,53}$	$\frac{30}{35}$	$\frac{0,92}{1,02}$
4А71В8	0,25	36	1	2 и 1	$\frac{1-6}{2-5}$ 1-6	1	146	1	0,40	29	0,92

Продолжение табл. П.9

Типоразмер двигателя	$P_{\text{дв}}$, кВт	Z	t	q	γ	α	$u_{\text{к}}$	n	d, мм	$l_{\text{в}}$, см	G, кг
4A80A2 4A80B2	1,5 2,2	24	1	2	1-12 2-11	$\frac{1}{1}$	$\frac{61}{48}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,80}{0,95}$	$\frac{48}{52}$	$\frac{1,64}{1,82}$
4A80A4 4A80B4	1,1 1,5	36	1	3	1-12 2-11 3-10	$\frac{1}{1}$	$\frac{60}{49}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,67}{0,75}$	$\frac{40}{43}$	$\frac{1,36}{1,55}$
4A80A6 4A80B6	$\frac{0,75}{1,1}$	36	1	2	1-8 2-7	$\frac{1}{1}$	$\frac{82}{58}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,60}{0,71}$	$\frac{34}{41}$	$\frac{1,3}{1,54}$
4A80A8 4A80B8	$\frac{0,37}{0,55}$	36	1	2 и 1	1-6 2-5 1-6	$\frac{1}{1}$	$\frac{121}{91}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,50}{0,56}$	$\frac{31}{35}$	$\frac{1,2}{1,3}$
4A90L2	3,0	24	1	2	1-12 2-11	2	84	1	0,8	58	2,65
4A90L4	2,2	36	1	3	1-12 2-11 3-10	1	40	1	0,90	47	1,95
4A90L6	1,5	36	1	2	1-8 2-7	1	51	1	0,86	44	1,95
4A90LA8 4A90LB8	$\frac{0,75}{1,1}$	36	1	2 и 1	1-6 2-5 1-6	$\frac{1}{1}$	$\frac{74}{58}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,63}{0,75}$	$\frac{37}{40}$	$\frac{1,3}{1,6}$
4A100S2 4A100L2	4,0 5,5	24	1	2	1-12 2-11	$\frac{2}{2}$	$\frac{38}{30}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,95}{1,08}$	$\frac{64}{70}$	$\frac{3,9}{4,2}$
4A100S4 4A100L4	$\frac{3,0}{4,0}$	36	1	3	1-12 2-11 3-10	$\frac{1}{1}$	$\frac{35}{27}$	1	$\frac{1,06}{1,25}$	$\frac{50}{56}$	$\frac{2,6}{3,1}$

Продолжение табл. П.9

Типоразмер двигателя	$P_{\text{дв}}$, кВт	Z	t	q	γ	a	$u_{\text{к}}$	n	d , мм	$l_{\text{в}}$, см	G , кг
4A100L6	2,2	36	1	2	$\begin{matrix} 1-8 \\ 2-7 \end{matrix}$	1	43	1	1,06	47	3
4A100L8	1,5	36	1	2 и 1	$\begin{matrix} 1-6 \\ 2-5 \\ 1-6 \end{matrix}$	1	54	1	0,95	44	2,8
4A112M2	7,5	36	1	3	$\begin{matrix} 1-18 \\ 2-17 \\ 3-16 \end{matrix}$	1	17	2	1,18	69	4,3
4A112M4	5,5	36	1	3	$\begin{matrix} 1-12 \\ 2-11 \\ 3-10 \end{matrix}$	1	25	1	1,4	58	3,7
$\frac{4A112MA6}{4A112MB6}$	$\frac{3,0}{4,0}$	54	1	3	$\begin{matrix} 1-12 \\ 2-11 \\ 3-10 \end{matrix}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{28}{23}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,12}{1,25}$	$\frac{46}{51}$	$\frac{3,1}{3,5}$
$\frac{4A132S4}{4A132M4}$	$\frac{7,5}{11}$	36	1	3	$\begin{matrix} 1-12 \\ 2-11 \\ 3-10 \end{matrix}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{22}{32}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,25}{1,06}$	$\frac{60}{69}$	$\frac{5,3}{6,7}$
$\frac{4A112MA8}{4A112MB8}$	$\frac{2,2}{3,0}$	48	1	2	$\begin{matrix} 1-8 \\ 2-7 \end{matrix}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{39}{31}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,06}{1,18}$	$\frac{42}{48}$	$\frac{3,2}{3,6}$
4A132M2	11	36	1	3	$\begin{matrix} 1-18 \\ 2-17 \\ 3-16 \end{matrix}$	2	29	2	1,06	80	6,7
$\frac{4A132S6}{4A132M6}$	$\frac{5,5}{7,5}$	54	1	3	$\begin{matrix} 1-12 \\ 2-11 \\ 3-10 \end{matrix}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{20}{15}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,06}{1,18}$	$\frac{52}{51}$	$\frac{4,5}{4,9}$

Продолжение табл. П.9

Типоразмер двигателя	$P_{\text{дв}}$, кВт	Z	t	q	γ	α	$u_{\text{к}}$	n	d, мм	$l_{\text{в}}$, см	G, кг
4A132S8 4A132M8	$\frac{4,0}{5,5}$	48	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{27}{21}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1,4}{1,12}$	$\frac{47}{56}$	$\frac{4,3}{5,1}$
4A160S2 4A160M2	$\frac{15}{18,5}$	36	2	6	1-13	$\frac{2}{2}$	$\frac{16}{14}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1,18}{1,06}$	$\frac{76}{82}$	$\frac{9,4}{10}$
4A160S4 4A160M4	$\frac{15}{18,5}$	48	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{27}{22}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,25}{1,4}$	$\frac{69}{77}$	$\frac{10}{11}$
4A160S6 4A160M6	$\frac{11}{15}$	54	1	3	$\frac{1-12}{2-11}$ 3-10	$\frac{3}{3}$	$\frac{46}{34}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,18}{1,35}$	$\frac{67}{78}$	$\frac{8,5}{9,3}$
4A160S8 4A160M8	$\frac{7,5}{11}$	48	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{41}{30}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1,32}{1,06}$	$\frac{60}{71}$	$\frac{7,3}{8,5}$
4A180S2 4A180M2	$\frac{22}{30}$	36	2	6	1-12	$\frac{2}{2}$	$\frac{14}{10}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{1,25}{1,5}$	$\frac{74}{86}$	$\frac{13}{15}$
4A180S4 4A180M4	$\frac{22}{30}$	48	2	4	1-11	$\frac{2}{2}$	$\frac{11 \text{ и } 12}{9}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1,5}{1,4}$	$\frac{72}{80}$	$\frac{14}{15}$
4A180M6	18,5	72	2	4	1-11	2	10	3	1,12	66	12
4A180M8	22	72	2	3	1-8	4	23	1	1,25	64	12
4A200M2 4A200L2	$\frac{37}{45}$	36	2	6	1-12	$\frac{2}{2}$	$\frac{10}{8 \text{ и } 9}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{1,5}{1,6}$	$\frac{86}{92}$	$\frac{20}{21}$
4A200M4 4A200L4	$\frac{37}{45}$	48	2	4	1-11	$\frac{2}{2}$	$\frac{8 \text{ и } 9}{7}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{1,18}{1,5}$	$\frac{85}{94}$	$\frac{18}{20}$
4A200M6 4A200L6	$\frac{22}{30}$	72	2	4	1-11	$\frac{3}{3}$	$\frac{14}{11}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,25}{1,4}$	$\frac{71}{76}$	$\frac{16}{17}$

Продолжение табл. П.9

Типоразмер двигателя	$P_{\text{дн}}$, кВт	Z	t	q	y	a	w_k	n	d, мм	$l_{\text{в}}$, см	G, кг
4A200M8 4A200L8	$\frac{18,5}{22}$	72	2	3	1-8	$\frac{2}{4}$	$\frac{11}{19}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,4}{1,5}$	$\frac{63}{68}$	$\frac{14}{15}$
4A225M2	55	36	2	6	1-12	2	7 и 8	5	1,6	101	26
4A225M4	55	48	2	4	1-11	4	13	3	1,4	97	26
4A225M6	37	72	2	4	1-11	3	10	3	1,32	82	23
4A225M8	30	72	2	3	1-8	2	8	3	1,5	72	20
4A250S2 4A250M2	$\frac{75}{90}$	48	2	8	1-15	$\frac{2}{2}$	$\frac{4 \text{ и } 5}{4}$	$\frac{4+4}{5+4}$	$\frac{1,5+1,6}{1,5+1,6}$	$\frac{111}{117}$	$\frac{34}{35}$
4A250S4 4A250M4	$\frac{75}{90}$	60	2	5	1-13	$\frac{4}{4}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{2+2}{5}$	$\frac{1,5+1,6}{1,5}$	$\frac{106}{114}$	$\frac{40}{41}$
4A250S6 4A250M6	$\frac{45}{55}$	72	2	4	1-11	$\frac{3}{3}$	$\frac{9}{7 \text{ и } 8}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{1,32}{1,4}$	$\frac{86}{90}$	$\frac{27}{27}$
4A250S8 4A250M8	$\frac{37}{45}$	72	2	3	1-8	$\frac{4}{4}$	$\frac{15}{12}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,4}{1,6}$	$\frac{76}{84}$	$\frac{23}{27}$
4AH160S2 4AH160M2	$\frac{22}{30}$	36	2	6	1-13	$\frac{2}{2}$	$\frac{14}{11}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,32}{1,5}$	$\frac{76}{84}$	$\frac{9,5}{10}$
4AH160S4 4AH160M4	$\frac{15}{18,5}$	48	1	2	1-12 2-11	$\frac{2}{2}$	$\frac{26}{21}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,25}{1,4}$	$\frac{69}{77}$	$\frac{9,7}{11}$

Продолжение табл. П.9

Типоразмер двигателя	$P_{\text{Зн}}^{\text{н}}$ кВт	Z	t	q	у	a	$u_{\text{к}}$	n	d, мм	$l_{\text{в}}$, см	G, кг
4АН180S2 4АН180M2	$\frac{37}{45}$	36	2	6	1-12	$\frac{2}{2}$	$\frac{10 \text{ и } 11}{9 \text{ и } 10}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{1,4}{1,5}$	$\frac{81}{86}$	$\frac{14}{15}$
4АН180S4 4АН180M4	$\frac{30}{37}$	48	2	4	1-11	$\frac{4}{4}$	$\frac{21}{27}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1,6}{1,25}$	$\frac{72}{80}$	$\frac{13}{15}$
4АН180S6 4АН180M6	$\frac{18,5}{22}$	72	2	4	1-11	$\frac{3}{3}$	$\frac{16}{13}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1,5}{1,18}$	$\frac{62}{70}$	$\frac{12}{13}$
4АН180S8 4АН180M8	$\frac{15}{18,5}$	72	2	3	1-8	$\frac{2}{2}$	$\frac{11}{9}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1,32}{1,18}$	$\frac{64}{74}$	$\frac{13}{14}$
4АН200M2 4АН200L2	$\frac{55}{75}$	36	2	6	1-12	$\frac{2}{2}$	$\frac{8}{6 \text{ и } 7}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{1,32}{1,5}$	$\frac{92}{100}$	$\frac{19}{21}$
4АН200M4 4АН200L4	$\frac{45}{55}$	48	2	4	1-11	$\frac{2}{2}$	$\frac{8}{6 \text{ и } 7}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{1,4}{1,6}$	$\frac{85}{94}$	$\frac{18}{21}$
4АН200M6 4АН200L6	$\frac{30}{37}$	72	2	4	1-11	$\frac{3}{3}$	$\frac{12}{9}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1,32}{1,25}$	$\frac{71}{82}$	$\frac{15}{18}$
4АН200M8 4АН200L8	$\frac{22}{30}$	72	2	3	1-8	$\frac{2}{4}$	$\frac{9}{13}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,6}{1,5}$	$\frac{68}{83}$	$\frac{15}{17}$
4АН225M2	90	36	2	6	1-12	2	6 и 7	6	1,6	101	25
4АН225M4	75	48	2	4	1-11	2	6	6	1,4	97	25
4АН225M6	45	72	2	4	1-11	3	9 и 10	3	1,32	82	21

Таблица П.10

Размеры статоров двигателей АО2, мм

Типоразмер двигателя	D_a	D	l	h	h_a	δ
АО2-11-2/12-2	133	73	52/65	13,8	16,2	0,35
АО2-11-4/12-4	133	80	52/65	14,6	11,9	0,25
АО2-11-6/12-6	133	80	65/75	18,5	8,0	0,25
АО2-21-2/22-2	153	86	63/90	15,5	18,0	0,40
АО2-21-4/22-4	153	94	70/95	16,5	13,0	0,25
АО2-21-6/22-6	153	98	70/95	17,8	9,7	0,25
АО2-31-2/32-2	180	106	88/115	17,7	19,3	0,50
АО2-31-4/32-4	180	112	88/115	19,4	14,6	0,30
АО2-31-6/32-6	180	122	88/115	19,1	9,9	0,30
АО2-41-2/42-2	208	123	110/148	20,95	21,6	0,70
АО2-41-4/42-4	208	133	110/148	21,55	16	0,35
АО2-41-6/42-6	208	144	110/148	20,95	11	0,35
АО2-41-8/42-8	208	144	110/148	20,95	11	0,35
АО2-51-2/52-2	243	140	135/170	24,8	26,7	0,70
АО2-51-4/52-4	243	158	135/170	22,85	19,1	0,45
АО2-51-6/52-6	243	173	135/190	21,05	14	0,40
АО2-51-8/52-8	243	173	135/190	21,05	14	0,40
АО2-62-2	291	153	150	28,1	40,9	0,70
АО2-61-4/62-4	291	180	135/165	28,0	27,5	0,55
АО2-61-6/62-6	291	206	150/190	26,0	16,5	0,40
АО2-61-8/62-8	291	206	150/190	26,0	16,5	0,40
АО2-71-2/72-2	343	183	130/165	29,7	50,3	0,85
АО2-71-4/72-4	343	214	165/205	30,3	34,2	0,70
АО2-71-6/72-6	343	245	165/205	27,7	21,3	0,50
АО2-71-8/72-8	343	245	165/205	27,7	21,3	0,50
АО2-81-2/82-2	393	211	170/210	33,0	58,0	1,00
АО2-81-4/82-4	393	247	190/260	34,7	38,3	0,90
АО2-81-6/82-6	393	285	190/260	31,9	22,1	0,60
АО2-81-8/82-8	393	285	190/260	31,9	22,1	0,60
АО2-91-2/92-2	458	247	215/270	39,0	66,5	1,20
АО2-91-4/92-4	458	290	240/330	40,7	43,7	1,00
АО2-91-6/92-6	458	334	240/330	33,0	29,0	0,70

Таблица П.11

Обмоточные данные двигателей серии АО2

Типоразмер двигателя	$P_{2н},$ кВт	Z	t	q	y	a	w_k	n	$d,$ мм	$l_n,$ см	$G,$ кг
$\frac{AO2-11-2}{AO2-12-2}$	$\frac{0,8}{1,1}$	24	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{97}{78}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,61}{0,71}$	$\frac{42}{45}$	$\frac{1,5}{1,6}$
$\frac{AO2-11-4}{AO2-12-4}$	$\frac{0,6}{0,8}$	24	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{129}{107}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,56}{0,63}$	$\frac{33}{35}$	$\frac{2,0}{1,3}$
$\frac{AO2-11-6}{AO2-12-6}$	$\frac{0,4}{0,6}$	36	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{122}{96}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,56}{0,63}$	$\frac{32}{34}$	$\frac{1,5}{1,7}$
$\frac{AO2-21-2}{AO2-22-2}$	$\frac{1,5}{2,2}$	24	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{69}{54}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,85}{0,95}$	$\frac{48}{54}$	$\frac{2,1}{2,3}$
$\frac{AO2-21-4}{AO2-22-4}$	$\frac{1,1}{1,5}$	24	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{92}{71}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,75}{0,90}$	$\frac{39}{44}$	$\frac{1,9}{2,2}$
$\frac{AO2-21-6}{AO2-22-6}$	$\frac{0,8}{1,1}$	36	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{85}{65}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,71}{0,80}$	$\frac{33}{38}$	$\frac{1,8}{2,1}$
$\frac{AO2-31-2}{AO2-32-2}$	$\frac{3,0}{4,0}$	24	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{44}{36}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1,18}{0,95}$	$\frac{54}{60}$	$\frac{3,2}{3,9}$
$\frac{AO2-31-4}{AO2-32-4}$	$\frac{2,2}{3,0}$	36	1	3	$\frac{1-12}{2-11}$ $\frac{3-10}{3-10}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{43}{34}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,06}{1,25}$	$\frac{48}{53}$	$\frac{3,1}{3,7}$
$\frac{AO2-31-6}{AO2-32-6}$	$\frac{1,5}{1,5}$	36	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{60}{46}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,0}{1,18}$	$\frac{42}{48}$	$\frac{3,4}{4,2}$
$\frac{AO2-41-2}{AO2-42-2}$	$\frac{5,5}{7,5}$	24	1	2	$\frac{1-12}{2-11}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{31}{51}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,25}{1,0}$	$\frac{72}{79}$	$\frac{6,1}{7,1}$
$\frac{AO2-41-4}{AO2-42-4}$	$\frac{4,0}{5,5}$	36	1	3	$\frac{1-12}{2-11}$ $\frac{3-10}{3-10}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{33}{24}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,06}{1,25}$	$\frac{58}{66}$	$\frac{5,7}{6,4}$
$\frac{AO2-41-6}{AO2-42-6}$	$\frac{3,0}{4,0}$	36	1	2	$\frac{1-8}{2-7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{41}{32}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1,38}{1,06}$	$\frac{46}{58}$	$\frac{5,2}{5,6}$
$\frac{AO2-41-8}{AO2-42-8}$	$\frac{2,2}{3,0}$	36	2	$\frac{1}{2}$ и $\frac{2}{2}$	1-5	$\frac{1}{1}$	$\frac{26}{20}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1,18}{0,90}$	$\frac{42}{50}$	$\frac{4,4}{5,1}$
$\frac{AO2-51-2}{AO2-52-2}$	$\frac{10}{13}$	24	2	4	1-10	$\frac{2}{2}$	$\frac{25}{20}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1,25}{1,18}$	$\frac{81}{88}$	$\frac{12}{13}$
$\frac{AO2-51-4}{AO2-52-4}$	$\frac{7,5}{10}$	36	2	3	1-8	$\frac{1}{1}$	$\frac{13}{10}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1,32}{1,25}$	$\frac{62}{69}$	$\frac{8}{9}$
$\frac{AO2-51-6}{AO2-52-6}$	$\frac{5,5}{7,5}$	36	2	2	1-6	$\frac{1}{1}$	$\frac{15}{11}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,18}{1,4}$	$\frac{55}{66}$	$\frac{6}{8}$
$\frac{AO2-51-8}{AO2-52-8}$	$\frac{4,0}{5,5}$	36	2	$\frac{1}{2}$ и $\frac{2}{2}$	1-5	$\frac{1}{1}$	$\frac{18}{13}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,12}{1,25}$	$\frac{52}{63}$	$\frac{6}{7}$
AO2-62-2	17	36	2	6	1-12	2	13	4	0,85	81	12

Продолжение табл. П.11

Типоразмер двигателя	$P_{2н}$, кВт	Z	t	q	y	a	w_k	n	d , мм	l_n , см	G , кг
АО2-61-4 АО2-62-4	$\frac{13}{17}$	36	2	3	1-8	$\frac{2}{2}$	$\frac{19}{15}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,25}{1,4}$	$\frac{65}{71}$	$\frac{10}{11}$
АО2-61-6 АО2-62-6	$\frac{10}{13}$	54	2	3	1-8	$\frac{2}{2}$	$\frac{17}{15}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,12}{1,18}$	$\frac{60}{75}$	$\frac{10}{11}$
АО2-61-8 АО2-62-8	$\frac{7,5}{10}$	54	2	$\frac{2,2}{2,3}$	1-7	$\frac{2}{2}$	$\frac{20}{15}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{0,85}{1,18}$	$\frac{58}{66}$	$\frac{10}{12}$
АО2-71-2 АО2-72-2	$\frac{22}{30}$	54	2	6	1-12	$\frac{2}{2}$	$\frac{12 \text{ и } 13}{9 \text{ и } 10}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1,32}{1,32}$	$\frac{94}{101}$	$\frac{17}{18}$
АО2-71-4 АО2-72-4	$\frac{22}{30}$	36	2	3	1-8	$\frac{4}{2}$	$\frac{25}{10}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1,18}{1,32}$	$\frac{82}{89}$	$\frac{15}{17}$
АО2-71-6 АО2-72-6	$\frac{17}{22}$	54	2	3	1-8	$\frac{2}{2}$	$\frac{12}{10}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{0,85}{1,6}$	$\frac{71}{79}$	$\frac{14}{16}$
АО2-71-8 АО2-72-8	$\frac{13}{17}$	54	2	$\frac{2,2}{2,3}$	1-7	$\frac{2}{2}$	$\frac{15}{11}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1,32}{1,5}$	$\frac{67}{75}$	$\frac{14}{15}$
АО2-81-2 АО2-82-2	$\frac{40}{55}$	36	2	6	1-12	$\frac{2}{2}$	$\frac{8 \text{ и } 9}{7}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{1,5}{1,6}$	$\frac{15}{119}$	$\frac{27}{28}$
АО2-81-4 АО2-82-4	$\frac{40}{55}$	48	2	4	1-11	$\frac{4}{4}$	$\frac{15}{11}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1,6}{1,32}$	$\frac{99}{113}$	$\frac{26}{31}$
АО2-81-6 АО2-82-6	$\frac{30}{40}$	72	2	4	1-11	$\frac{2}{3}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{1,6}{1,5}$	$\frac{85}{99}$	$\frac{24}{27}$
АО2-81-8 АО2-82-8	$\frac{22}{30}$	72	2	3	1-8	$\frac{2}{2}$	$\frac{9}{7}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{1,4}{1,6}$	$\frac{76}{90}$	$\frac{21}{25}$
АО2-91-2 АО2-92-2	$\frac{75}{100}$	48	2	8	1-16	$\frac{2}{2}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{8}{10}$	$\frac{1,6}{1,6}$	$\frac{130}{141}$	$\frac{46}{50}$
АО2-91-4 АО2-92-4	$\frac{75}{100}$	60	2	5	1-13	$\frac{4}{4}$	$\frac{9}{7}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{1,6}{1,6}$	$\frac{117}{135}$	$\frac{47}{52}$
АО2-91-6 АО2-92-6	$\frac{55}{75}$	72	2	4	1-11	$\frac{3}{3}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{1,5}{1,0}$	$\frac{102}{120}$	$\frac{33}{39}$
АО2-91-2 АО2-92-2	$\frac{75}{100}$	48	2	8	1-16	$\frac{2}{2}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{8}{10}$	$\frac{1,6}{1,6}$	$\frac{130}{141}$	$\frac{46}{50}$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ванурин В. Н.* Электрические машины. — М. : Колос, 1995. — 256 с.
2. *Ванурин В. Н.* Статорные обмотки асинхронных электрических машин. — СПб. : Лань, 2014. — 176 с.
3. *Сукманов В. И.* Электрические машины и аппараты. — М. : Колос, 2001. — 296 с.
4. *Александров Н. Н.* Электрические машины и микромашины. — М. : Колос, 1983. — 384 с.
5. *Костенко М. П.* Электрические машины / М. П. Костенко, Л. М. Пиротровский. — Л. : Энергия, 1973. — Ч. 2. — 648 с.
6. *Андреанов В. Н.* Электрические машины и аппараты. — М. : Колос, 1971. — 484 с.
7. *Гольдберг О. Д.* Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, И. С. Свириденко. — М. : Высш. шк., 2006. — 430 с.
8. *Гурин Я. С.* Проектирование серий электрических машин / Я. С. Гурин, Б. И. Кузнецов. — М. : Энергия, 1978. — 480 с.
9. *Богатырёв Н. И.* Статорные обмотки и параметры асинхронных двигателей и генераторов / Н. И. Богатырёв, В. Н. Ванурин, О. В. Вронский. — Краснодар : КУБГАУ, 2013. — 352 с.
10. *Богатырёв Н. И.* Электрические машины переменного тока / Н. И. Богатырёв, В. Н. Ванурин, К. А.-А. Джанибеков. — Краснодар : КУБГАУ, 2011. — 224 с.
11. *Кравчик А. Э.* Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин [и др.]. — М. : Энергоиздат, 1982. — 504 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
<i>Глава первая</i>	
Машины постоянного тока	11
1.1. Назначение, устройство и принцип действия	11
1.2. Обмотки якоря	15
1.3. Магнитная цепь машины постоянного тока	21
1.4. Реакция якоря	24
1.5. Процесс коммутации	27
1.6. Генераторы постоянного тока	33
1.7. Сварочные генераторы	40
1.8. Электромашинный усилитель	44
1.9. Тахогенераторы постоянного тока	51
1.10. Двигатели постоянного тока	52
1.11. Исполнительные двигатели	60
<i>Глава вторая</i>	
Трансформаторы	63
2.1. Назначение, устройство и принцип действия	63
2.2. Сталь магнитопроводов	67
2.3. Обмотки трансформаторов	70
2.4. Системы охлаждения трансформаторов	74
2.5. Схемы и группы соединения обмоток	81
2.6. Параметры и схема замещения трансформатора	87
2.7. Опытное определение параметров и эксплуатационные свойства трансформаторов	92
2.8. Параллельная работа трансформаторов	98
2.9. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке	102
Несимметричная нагрузка при соединении обмоток Y/Δ	106
Несимметричная нагрузка при соединении обмоток Y/Y_n	106
Несимметричная нагрузка при соединении обмоток Y/Z_n	108
2.10. Явления при намагничивании трансформатора	109
2.11. Трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы	111
2.12. Маркировка трансформаторов	119
2.13. Переходные процессы в трансформаторах	120
2.14. Трансформаторы выпрямительных установок, сварочные трансформаторы	126
2.15. Измерительные трансформаторы	129

Глава третья

Асинхронные машины	134
3.1. Назначение, принцип действия и устройство	134
3.2. Серии асинхронных двигателей	136
3.3. Магнитодвижущая сила и схемы обмоток	141
3.4. Схема замещения асинхронного двигателя	159
3.5. Механическая характеристика двигателя	163
3.6. Параметры асинхронных двигателей	167
3.7. Рабочие характеристики и эксплуатационный КПД двигателя	185
3.8. Определение характеристик по круговой диаграмме токов	188
3.9. Действие высших гармоник на пуск двигателя	192
3.10. Способы регулирования частоты вращения	200
3.11. Работа двигателя при несимметрии напряжения	210
3.12. Работа при несимметрии в цепи ротора	212
3.13. Трехфазно-двухфазные и однофазные двигатели	214
3.14. Асинхронная машина в качестве генератора	219
3.15. Особые режимы работы асинхронных машин	224
3.16. Универсальные коллекторные двигатели	230

Глава четвертая

Синхронные машины	235
4.1. Назначение, устройство и принцип действия	235
4.2. Приведение МДС якоря к МДС возбуждения, параметры и векторные диаграммы генераторов	241
4.3. Характеристики синхронных генераторов	248
4.4. Работа генератора параллельно с сетью, угловая характеристика генератора	252
4.5. Переходные процессы при внезапном коротком замыкании генератора	257
4.6. Генераторы автономных электростанций	263
4.7. Синхронные двигатели	267
4.8. Индукционные системы синхронной связи	272
Приложение	281
Литература	301

Владимир Николаевич ВАНУРИН
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
Учебник

Зав. редакцией инженерно-технической
литературы *Т. Ф. Гаврильева*
Ответственный редактор *Н. В. Черезова*
Технический редактор *Е. Е. Егорова*
Корректор *М. В. Бекрешева*
Подготовка иллюстраций *А. П. Маркова*
Верстка *М. И. Хетерели*
Выпускающие *Е. П. Королькова, Т. С. Симонова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А.
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

*Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться
в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:*

по России и зарубежью
«ЛАНЬ-ТРЕЙД». 192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13
тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93
e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967
www.lanpbl.spb.ru/price.htm

в Москве и в Московской области
«ЛАНЬ-ПРЕСС». 109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, д. 6/19
тел.: (499) 178-65-85; e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае
«ЛАНЬ-ЮГ». 350901, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1
тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазин
Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>
магазин электронных книг
Global F5: <http://globalf5.com/>

Подписано в печать 26.02.16.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 15,96. Тираж 200 экз.

Заказ № 019-16.
Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.