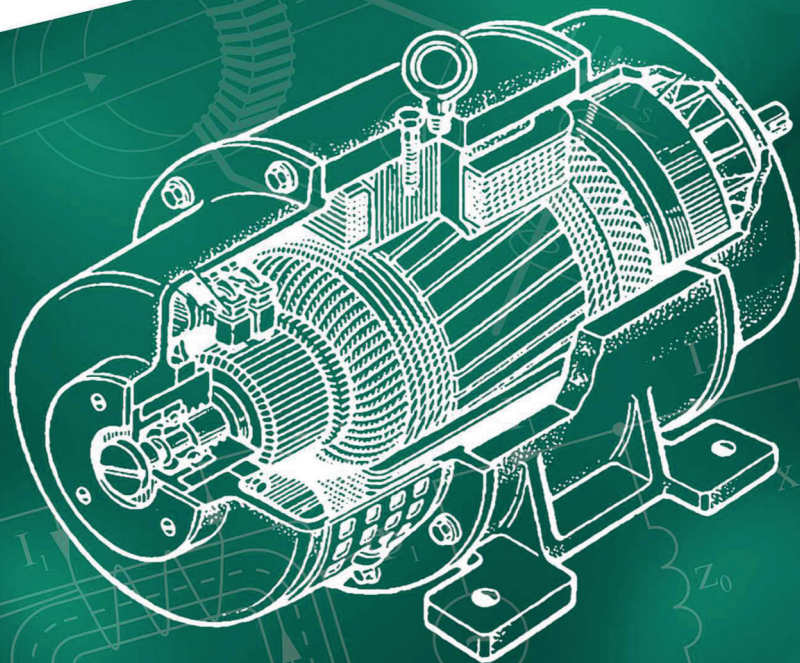


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ



В. Е. Белай, М. С. Романова, М. В. Сержантова

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

В. Е. Белай, М. С. Романова, М. В. Сержантова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2022

УДК 621.313

ББК 31.261

Б43

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент *В. В. Булатов*;
кандидат технических наук, доцент *Ю. В. Литвинов*

Утверждено

редакционно-издательским советом университета
в качестве учебно-методического пособия

Протокол № 6 от 29 ноября 2022 г.

Белай, В. Е.

Б43 **Электрические машины: учеб.-метод. пособие / В. Е. Белай, М. С. Романова, М. В. Сержантова. – СПб.: ГУАП, 2022. – 102 с.**

Массовое внедрение киберфизических систем в производство и повседневную жизнь повлекло за собой увеличение энергопотребления, что ставит перед электроэнергетической отраслью новые задачи. В пособии продемонстрированы современные методы расчета электрических машин на примере однофазного трансформатора и двигателя постоянного тока для погружения в дисциплину «Электрические машины» образовательной программы подготовки обучающихся по направлениям подготовки: 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», 15.04.06 – «Мехатроника и робототехника», 13.05.02 – «Специальные электромеханические системы», а также для молодых специалистов, которым по роду деятельности приходится иметь дело с задачами, связанными с расчетом и проектированием электрических машин в электромеханических и электроэнергетических системах.

Подготовлено к публикации кафедрой электромеханики и робототехники ГУАП.

УДК 621.313

ББК 31.261

Учебное издание

Белай Василий Евгеньевич,
Романова Марина Сергеевна,
Сержантова Майя Вячеславовна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие

Публикуется в авторской редакции
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 13.12.2022. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2. Тираж 50 экз. Заказ № 613.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

© Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения, 2022

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 году ГУАП вошел в число вузов-победителей конкурсного отбора для участия в программе «Приоритет – 2030». Реализация программы позволит к 2030 году трансформировать ГУАП в многопрофильный исследовательский университет в сфере прикладных инженерных разработок, один из лучших в России и заметный в мире, который будет заниматься подготовкой кадров для высокотехнологичной индустрии и разработкой передовых технологий.

Четвертая промышленная революция, начавшаяся в начале 2000 годов и участниками которой, мы с Вами являемся, ставит новые задачи энергетической отрасли. Так как развитие механизмов и машин на современном этапе неизбежно влечет за собой увеличение потребления электрической энергии, что ставит перед инженерами задачи по созданию современных устройств генерации, переработки и распределению электрической энергии.

Мощности электростанций растут, создаются турбогенераторы – машины, непосредственно соединенные с паровой турбиной. Увеличивается мощность генераторов и трансформаторов. Если в 1900 году мощность генератора не превышала 5 тыс. кВА, к 1920 году были построены турбогенераторы мощностью 60 тыс. кВА, в 1978 г. Ленинградский завод «Электросила» имени С. М. Кирова отгружал в адрес Костромской ГРЭС турбогенераторы мощностью 1200 кВт [1], то в наше время создаются электрические машины мощностью 220 000 кВт [2].

В результате научно-технического прогресса в энергомашиностроении, металлургии, благодаря созданию новых материалов, успехам технологии единичную мощность отечественных турбогенераторов удалось повысить с 0.5 тыс. кВт (1924 г.) до 1200 кВт (1975 г.), т. е. за 50 лет она выросла в 2400 раз, а за последние 40 лет мощность выросла еще почти в 200 раз.

Это большое достижение нашей науки и техники, особенно если учесть, что чем мощнее создаваемая машина, тем сложнее узел проблем, встающих перед учеными, конструкторами, инженерами. В решении этих проблем конструкторам помогают современные технологии, ориентированные на современные вычислительные мощности, а также системы искусственного интеллекта, больших данных и машинного обучения. Использование современных тех-

нологий и материалов позволяет создавать современное энергетическое оборудование дешевле и быстрее, так как существенная часть экспериментальной конструкторской работы сейчас осуществляется с применением так называемых «цифровых двойников».

История создания и развития электрических машин началась с первой модели, созданной М. Фарадеем. Он первый высказал идею преобразования электрической энергии в механическую в 1821 году и создал первую модель электрического двигателя. Электрический ток в машине Фарадея, протекая по медному проводу, вызывал его движение вокруг вертикально поставленного постоянного магнита. Однако дальнейшие работы по созданию электродвигателя в течение более чем десятилетнего периода не принесли удовлетворительных результатов. Лишь в 1834 году русским академиком Б. С. Якоби была создана конструкция, послужившая прототипом современного электродвигателя.

Возможность создания электрического генератора возникла только после открытия М. Фарадеем в 1831 году закона электромагнитной индукции. Используя это открытие, братья Пикси в 1832 году создали конструкцию первого электрического генератора с вращающимися постоянными магнитами и с коммутатором для выпрямления тока.

Первое время развитие электродвигателей и генераторов шло независимо друг от друга.

В 1833 году Ленцем был сформулирован принцип обратимости электрических машин, а в 1838 году этот принцип был практически осуществлен.

Дальнейшим этапом развития генераторов явилась замена постоянных магнитов электромагнитами.

Начальный период развития электрических машин связан главным образом с постоянным током. Объясняется это тем, что потребителями электрической энергии являлись установки, работающие исключительно на постоянном токе (дуговые лампы, установки гальванопластики и т. п.). Применение электрического освещения в крупных городах потребовало повышения мощности электрических генераторов и их дальнейшего усовершенствования.

В 1867 году В. Сименс применил принцип самовозбуждения для генераторов последовательного возбуждения. В этом же году Д. Максвелл впервые дал математическую теорию электрической машины с самовозбуждением, заложив основы теории электрических машин.

В 1870 году З. Грамм построил машину с кольцевым якорем, а в 1873 году Ф. Гефнер-Алтенеке и В. Сименс сконструировали машину с «барабанным» якорем.

Развитие электрических железных дорог значительно увеличило спрос на электродвигатели и генераторы, что способствовало их дальнейшему совершенствованию.

В 80-х годах XIX века возникла необходимость передавать электроэнергию на расстояние. В 1882 году были проведены опыты по передаче электроэнергии на постоянном токе при повышенном напряжении. Однако высокое напряжение в генераторах постоянного тока ухудшило работу коллектора, что часто приводило к авариям. Все это усиливало интерес электротехников того времени к переменному току.

Большая заслуга в развитии переменного тока принадлежит русскому ученому П. Н. Яблочкову, который широко использовал переменный ток для питания изобретенных им электрических свечей. В 1876 году П. Н. Яблочков применил для питания этих свечей трансформаторы с незамкнутым сердечником, положив тем самым начало практическому использованию трансформаторов.

Трансформаторы с замкнутым сердечником, подобные современным трансформаторам, появились позднее, в 1884 году.

Началом практического применения переменного тока для целей электропривода следует считать 1889 год, когда выдающийся русский инженер М. О. Доливо-Добровольский предложил для практического применения трехфазную систему переменного тока и построил трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор.

Первая линия электропередачи трехфазного переменного тока протяженностью 175 км при напряжении 15 тысяч вольт с применением трехфазных трансформаторов была сооружена Доливо-Добровольским в 1891 году. Результаты испытаний этой линии подтвердили возможность применения системы трехфазного тока для передачи значительных количеств электроэнергии при сравнительно высоком КПД.

К началу 20 века были созданы все основные виды электрических машин и разработаны основы их теории. Начиная с этого времени быстрыми темпами происходит электрификация промышленности и транспорта [3].

Методическое пособие ставит своей целью продемонстрировать современные методы расчета электрических машин на примере однофазного трансформатора и двигателя постоянного тока.

Методическое пособие состоит из следующих разделов:

– Введение, которое погружает читателя в текущее состояние науки в рассматриваемой отрасли.

– Общетеоретические сведения о принципах действия трансформаторов. Рассматривается реальный трансформатор, который, в отличие от идеального, имеет потери в меди. Вкратце рассматривается конструкция трансформатора с описанием типов магнитопроводов, способов сборки магнитопроводов из пластин и принципы выбора проводов и изолирующих материалов. Приводятся основные определения и расчетные соотношения для электрического и конструктивного расчетов. В качестве примера расчета трансформатора рассматривается трансформатор с Ш-образным магнитопроводом. Для закрепления пройденного материала предлагается выполнить практическое задание по вариантам.

– Теоретические сведения о двигателях постоянного тока, обладающие свойством обратимости, представлены в одноименном разделе. В этом же разделе рассматривается введение дополнительного сопротивления в цепь якоря аналогично пусковому реостату для обеспечения регулирования частоты вращения двигателя. Значимое место в расчетах машин постоянного тока занимает расчет потерь, поскольку он имеет тесную связь с коэффициентом полезного действия двигателя постоянного тока. Для закрепления пройденного материала предлагается выполнить задание по вариантам.

Авторский коллектив выражает благодарность за помощь подготовке студентам кафедры электромеханики и робототехники:

Борисову Никите Андреевичу,
Выграновской Арине Вячеславовне,
Кирилловой Елене Владимировне,
Куцулиму Денису Владимировичу,
Приходскому Андрею Александровичу,
Худайбердиной Алсу Рифовне.

1. ТРАНСФОРМАТОР

1.1. Однофазные трансформаторы

Для работы электронных и радиотехнических устройств возникает необходимость иметь несколько источников постоянного напряжения. Эти источники называются источниками вторичного электропитания (ИВЭ). Первичным источникам питания являются сети переменного тока 127 и 220 В и частотой 50 Гц. Для питания самолетной и морской аппаратуры используются сети с частотой 400 Гц. Исключением являются маломощные устройства, например, транзисторные приемники, первичным (и единственным) источником электропитания которых является батарея или аккумулятор.

Чтобы обеспечить аппаратуру нужными постоянными напряжениями, необходимо сначала повысить или понизить переменное напряжение питающей сети до требуемых значений, далее при помощи выпрямителей получить постоянные напряжения. Повышение или понижение напряжения питающей сети осуществляется трансформатором, который играет роль необходимого посредника между питающей сетью и потребителями постоянного напряжения. Очевидно, что трансформатор требуется и в тех случаях, когда нужно получить переменное напряжение, отличающееся от напряжения питающей сети (например, для питания накала электровакуумных приборов).

Трансформатор необходим также и тогда, когда первичным источником электропитания аппаратуры, требующей нескольких напряжений, является сеть постоянного тока (например, аккумуляторная или солнечная батарея). В таких случаях чаще всего применяются транзисторные (статические) преобразователи напряжения, в состав которых всегда входят трансформаторы с необходимым числом обмоток, что позволяет после выпрямления получить различные постоянные напряжения.

Таким образом, трансформатор является весьма гибким и универсальным преобразователем электрической энергии, что обеспечило его исключительно широкое распространение.

1.2. Принцип действия трансформатора

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции Фарадея, в соответствии с которым напряже-

ние, возникающее на концах витка, пропорционально скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот виток. Данный закон можно записать следующим образом

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где ε – электродвижущая сила индукции, В; Φ – магнитный поток, Вб.

Согласно данному выражению направление индукционного тока, возникающего в замкнутом контуре, противоположно магнитному потоку, которым данный ток был вызван.

Если тот же магнитный поток пронизывает одновременно несколько витков, то он, естественно, возбуждает в каждом витке одинаковое напряжение. Это дает нам возможность путем последовательного соединения нескольких витков получать более высокие напряжения. В этих физических явлениях заложена идея трансформации переменного тока с помощью двух (или более) групп последовательно соединенных витков, называемых обмотками.

Если приложить переменное напряжение (т. е. меняющееся по значению и направлению) к концам обмотки, которую назовем первичной, то под действием этого напряжения через обмотку будет протекать переменный ток, создавая в окружающем обмотку пространстве переменный магнитный поток. Если этот магнитный поток будет пронизывать витки другой обмотки, называемой вторичной, то в ней возникнет переменное напряжение, называемое электродвижущей силой (ЭДС) вторичной обмотки, которое будет пропорционально числу ее витков и скорости изменения магнитного потока. Отсюда следует, что для трансформации переменного напряжения необходимо иметь две обмотки и охватывающий их переменный магнитный поток, изменяющийся по значению и направлению.

Очевидно, что трансформатор может иметь несколько вторичных обмоток с разными напряжениями (ЭДС) и, следовательно, с разными числами витков, однако все обмотки должны быть пронизаны одним и тем же магнитным потоком.

1.3. Законы трансформации

Вернемся к процессам, происходящим в первичной обмотке трансформатора. Переменное напряжение, приложенное к первичной обмотке, создает переменный магнитный поток; этот поток,

пронизывая витки первичной обмотки, индуцирует в них переменное напряжение, почти равное приложенному напряжению, но противоположное ему по направлению. Индуцированное в первичной обмотке напряжение называют ЭДС первичной обмотки.

Электродвижущая сила первичной обмотки E_1 лишь незначительно меньше приложенного напряжения U_1 и почти полностью его уравнивает. Напряжение U_1 обеспечивает также протекание так называемого намагничивающего тока, создающего переменный магнитный поток в трансформаторе. Так как ЭДС первичной обмотки и ЭДС вторичных обмоток вызываются одним и тем же магнитным потоком, то очевидно, что эта ЭДС и вторичные ЭДС совпадают между собой по направлению.

Электродвижущая сила вторичной обмотки E_2 реального трансформатора, который отличается от идеального наличием потерь энергии, будет немного больше напряжения U_2 , измеренного на концах вторичной обмотки.

Если рассматривать идеальный трансформатор (без потерь энергии), то напряжения и ЭДС соответствующих обмоток будут равны между собой ($U = E$). Чем меньше потери энергии в трансформаторе, тем меньше отличаются напряжения от соответствующих ЭДС, поэтому в ряде случаев можно пользоваться приближенным равенством:

$$U \approx E.$$

При прочих равных условиях число витков первичной обмотки всегда должно быть прямо пропорционально приложенному напряжению, а точнее – ЭДС первичной обмотки. Что касается числа витков вторичной обмотки, то выше уже отмечалось, что оно прямо пропорционально ЭДС вторичной обмотки. Таким образом, приходим к первому основному закону трансформации: ЭДС вторичной обмотки так относится к ЭДС первичной обмотки, как число витков вторичной обмотки к числу витков первичной:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

или, учитывая $U \approx E$, можно воспользоваться приближенным равенством:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Рассмотрим вначале работу идеального трансформатора под нагрузкой. Если замкнуть вторичную обмотку на нагрузочное сопротивление, то по виткам вторичной обмотки будет проходить переменный ток. Этот ток вызовет появление нового магнитного потока, который по правилу Ленца будет направлен против основного потока и будет стремиться подавить этот основной поток, обеспечивающий трансформацию. Однако ЭДС первичной обмотки, созданная основным потоком и уравнивающая приложенное напряжение, требует поддержания основного магнитного потока в том виде, каким он был до включения нагрузки. Для этого существует только один путь: одновременно с током нагрузки вторичной обмотки по первичной обмотке также должен протекать соответствующий ток нагрузки, зависящий от вторичного тока, а магнитные потоки, создаваемые этими токами нагрузок, должны быть противоположны по знаку и равны по значению.

Магнитные потоки компенсируют друг друга, в результате чего основной магнитный поток остается без изменения (не подавляется). Такой процесс происходит при работе трансформатора под нагрузкой. Очевидно, что первичная обмотка будет при этом пропускать два тока: ток нагрузки и ток намагничивания, создающий основной поток. Оба тока образуют первичный ток трансформатора. Так как магнитный поток пропорционален произведению тока обмотки на число ее витков (т. е. магнитодвижущей силе обмотки), то условие равенства магнитных потоков нагруженного трансформатора можно записать как:

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2.$$

Если пренебречь током намагничивания, который обычно составляет малую долю первичного тока, то можно сформулировать второй основной закон трансформации: ток первичной обмотки так относится к току вторичной обмотки, как число витков вторичной обмотки относится к числу витков первичной:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

1.4. Реальный трансформатор

Для того чтобы токи обмоток трансформатора обтекали каждый виток в нужном направлении, необходимо все витки изолировать друг от друга, поэтому обмотки изготавливают из проводов, покры-

тых снаружи изоляционным слоем эмали, шелка или хлопчатобумажной пряжи. Для уменьшения потерь энергии при трансформировании обмотки чаще всего делают из медного провода, обладающего наименьшим омическим (активным) сопротивлением. В некоторых случаях, с целью экономии дефицитной меди, для обмоток используют алюминиевый провод, сопротивление которого в 1,6 раза больше, чем медного. Естественно, что в этом случае потери энергии в обмотках трансформатора при равенстве сечений проводов возрастают во столько же раз.

Требование о том, чтобы обе обмотки трансформатора полностью охватывались одним и тем же основным магнитным потоком, может быть выполнено только в том случае, когда для магнитного потока будет создан путь с очень малым магнитным сопротивлением. Такой путь мы имеем возможность создать, применяя замкнутый магнитопровод из стали, при этом магнитный поток будет замыкаться внутри этого магнитопровода, не ответвляясь в окружающее пространство, которое представляет для потока большое магнитное сопротивление.

Теперь трансформатор представляется нам в виде стального магнитопровода, на котором располагаются обмотки из медного изолированного провода.

В реальном трансформаторе обнаруживаются некоторые отличия от идеального, на первый взгляд незначительные, но приводящие к ряду затруднений, в преодолении которых и заключается задача конструирования трансформатора.

В реальном трансформаторе медный провод первичной обмотки оказывает определенное сопротивление протекающему току, что вызывает падение напряжения в обмотке ΔU_1 . В результате ЭДС E_1 наводимая в первичной обмотке, должна уравновешивать уже не все приложенное напряжение ΔU_1 , а только ту его часть, которая остается за вычетом падения напряжения ΔU_2 в обмотке; эта особенность реального трансформатора приводит к уменьшению ЭДС первичной обмотки.

Вторичная обмотка также обладает сопротивлением, которое и в этом случае является причиной, вызывающей падение напряжения в обмотке ΔU_2 . Это падение вычитается из ЭДС E_2 , индуцированной во вторичной обмотке. На выводах вторичной обмотки трансформатора действует напряжение U_2 , меньшее, чем ЭДС вторичной обмотки.

В реальном трансформаторе не весь магнитный поток, возбуждаемый первичной обмоткой, пронизывает витки вторичной обмот-

ки, часть магнитного потока замыкается через воздух, оставляя в стороне вторичную обмотку. Это приводит к уменьшению ЭДС вторичной обмотки, что равноценно увеличению падения напряжения. Такое же явление возникает и в том случае, когда магнитный поток вторичной обмотки охватывает не все витки первичной обмотки.

Потери энергии на перемагничивание стального магнитопровода и на создание в нем вредных вихревых токов приводят к возрастанию тока первичной обмотки на значение, необходимое для компенсации этих потерь. Поэтому потери энергии в магнитопроводе вызывают дополнительное увеличение падения напряжения в первичной обмотке.

В отличие от идеального трансформатора в реальном трансформаторе имеются потери энергии в меди, обусловленные падением напряжения в обмотках, и потери энергии в стали, складывающиеся из потерь на перемагничивание и на вихревые токи. Энергия всех этих потерь выделяется в виде теплоты, которая нагревает трансформатор; его температура будет возрастать до тех пор, пока не установится равновесие между теплотой, выделяемой в трансформаторе, и теплотой, отдаваемой трансформатором во внешнюю

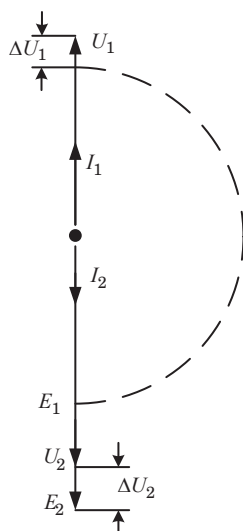


Рис. 1.1. Упрощенная векторная диаграмма нагруженного трансформатора

среду. Температура трансформатора устанавливается не сразу, сначала она возрастает довольно быстро, а затем ее рост замедляется. Чем больше поверхность охлаждения трансформатора, тем ниже будет его установившаяся температура. Время установления температуры меняется от 1–2 ч для маломощных трансформаторов до 20–30 ч для трансформаторов большой мощности. Разность между установившейся температурой и температурой окружающей среды пропорциональна потерям энергии и называется превышением температуры трансформатора.

Если реальный трансформатор не нагружен, т. е. работает в режиме холостого хода, то ток первичной обмотки (ток холостого хода) состоит из тока намагничивания, создающего магнитный поток, и тока, компенсирующего потери энергии в стали,

а ЭДС и напряжения соответствующих обмоток практически равны между собой. В режиме холостого хода трансформатор нагревается только за счет потерь в стали магнитопровода; потери в меди, вызываемые током холостого хода, очень малы. В нагруженном трансформаторе ток холостого хода суммируется с током нагрузки первичной обмотки.

Напряжения, ЭДС и токи трансформатора удобно представлять в виде векторной диаграммы, на которой все эти величины изображаются векторами определенной длины и направления. На рис. 1.1 показана упрощенная векторная диаграмма нагруженного трансформатора, у которого ЭДС вторичной обмотки E_2 в 2 раза больше ЭДС первичной обмотки E_1 , при этом в соответствии со вторым основным законом трансформации ток вторичной обмотки I_2 будет в 2 раза меньше тока первичной I_1 (без учета тока холостого хода). На диаграмме векторами ΔU_1 и ΔU_2 обозначены соответственно падения напряжения в первичной и вторичной обмотках.

1.5. Конструктивные особенности трансформаторов

Рассмотрим вкратце некоторые вопросы конструкции маломощных трансформаторов, в том числе устройство магнитопроводов и обмоток. Магнитопровод трансформатора должен быть замкнутым стальным. На рис. 1.2 показаны наиболее распространенные типы магнитопроводов, применяемые для трансформаторов питания. Чтобы уменьшить потери на перемагничивание стали, для магнитопроводов применяют специальную электротехническую сталь (например, марок 3411–3414, 3421–3424), представляющую собой сплав железа с 0,5–5% кремния. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод набирают из изолированных друг от друга тонких (0,2–0,5 мм) пластин (рис. 1.2, а–в) или навивают из изолированной ленты толщиной 0,05–0,1 мм (рис. 1.2, г, д), при этом возрастает электрическое сопротивление магнитопровода, что снижает силу вихревых токов и, следовательно, потери.

Для трансформаторов, работающих на повышенных частотах (до 25 кГц) в схемах транзисторных преобразователей напряжения, применяют ленточные кольцевые магнитопроводы (рис. 1.2, е) из специальных сплавов железа с никелем, содержащих от 36 до 80% никеля и некоторые другие элементы (например, молибден, кобальт, хром, марганец). Толщина ленты у этих магнитопроводов лежит в пределах от 0,01 до 0,05 мм. Сплавы указанного типа (например, марок 50НП, 79НМ) называют пермаллоями. Следует

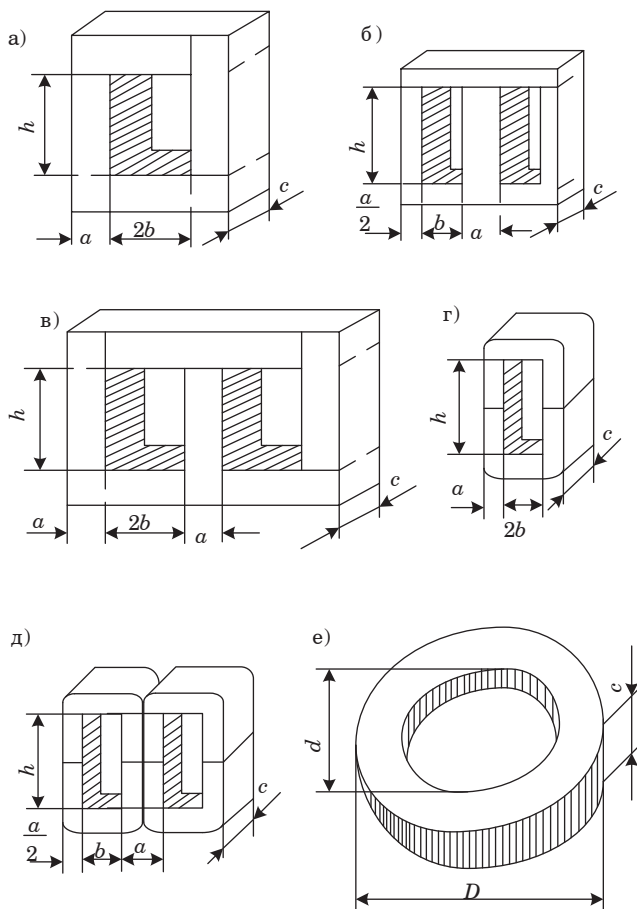


Рис. 1.2. Основные типы магнитопроводов

иметь в виду, что при уменьшении толщины стали падают потери на вихревые токи, но растут потери на перемагничивание. Поэтому в зависимости от частоты преобразователя следует выбирать материал для магнитопровода такой оптимальной толщины, чтобы уменьшение потерь на вихревые токи не перекрывалось увеличением потерь на перемагничивание.

Магнитопроводы состоят из одного или нескольких стержней и ярма, замыкающего магнитный поток. Сечение ярма обычно равно или несколько больше сечения стержня; в последнем случае ярмо называют усиленным. Кольцевой магнитопровод (рис. 1.2, e) мож-

но рассматривать как магнитопровод с одним стержнем. На рисунке все стержни (кроме рис. 1.2, *e*) расположены вертикально. На стержнях размещаются обмотки трансформатора.

На рис. 1.2, *a, г* изображены магнитопроводы стержневого (II-образного типа) с неразветвленной магнитной цепью. Они имеют по два стержня. На рисунке 1.2, *б, д* показаны магнитопроводы броневые (III-образного) типа с одним стержнем и разветвленной магнитной цепью. Магнитный поток выходит из стержня и разделяется на две части, каждая из которых замыкается через верхнее, боковое и нижнее ярма. На рис. 1.2, *в* показан трехфазный магнитопровод, имеющий три стержня. Трехфазные трансформаторы с такими магнитопроводами применяют при достаточно больших мощностях в отличие от маломощных однофазных трансформаторов, для которых используются стержневые, броневые и кольцевые магнитопроводы.

Магнитопроводы, показанные на рисунке 1.2, *a–в*, изготовляют из штампованных пластин, которые после штамповки обычно отжигают в воздушной среде при 400–500 °С для улучшения магнитных свойств. Способ сборки магнитопроводов из таких пластин показан на рис. 1.3. Каждый последующий слой перекрывает стыки предыдущего слоя.

Такой способ называется сборкой внахлестку или вперекрышку. Сборка впритык, когда все слои имеют одинаковый рисунок, создает в местах стыка воздушный зазор, увеличивающий магнитное сопротивление. В связи с этим в небольших магнитопро-

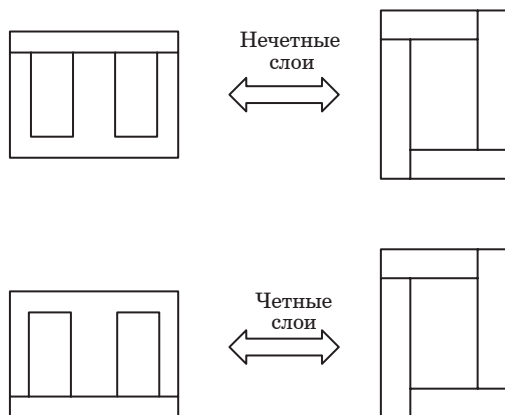


Рис. 1.3. Способы сборки магнитопроводов из пластин

водах из пластин сборку впритык не применяют. Изоляцией между пластинами обычно служит пленка окиси, которая образуется при изготовлении электротехнической стали на заводе или при отжиге. Для изготовления ленточных разрезных магнитопроводов (рис. 1.2, *з, д*) ленту из электротехнической стали навивают на металлическую оправку, а затем отжигают на воздухе при температуре 400–500 °С для улучшения ее магнитных свойств. После этого магнитопровод обволакивают склеивающим составом либо пропитывают лаком, которые скрепляют навитую ленту. Обработанный таким способом магнитопровод разрезается в местах, показанных на рис. 1.2, *з, д*. Магнитопроводы стержневого типа (рис. 1.2, *з*) состоят из двух, а магнитопроводы броневого типа (рис. 1.2, *д*) из четырех П-образных одинаковых частей. В данном случае сборка этих частей производится впритык, так как места стыка хорошо шлифуются друг к другу, а затем склеиваются специальным клеем (карбонильным железом), имеющим малое магнитное сопротивление.

Кольцевые (неразрезные) магнитопроводы из тонких ленточных материалов (пермалоев) во время навивки покрывают электроизолирующим материалом, а затем отжигают в вакууме при 1000–1100° С. Разрезать такие магнитопроводы нельзя, так как при этом значительно ухудшаются их магнитные свойства. Пермалловые магнитопроводы очень чувствительны к механическим деформациям и ударам, которые заметно ухудшают их магнитные свойства. Поэтому такие магнитопроводы обычно помещают в пластмассовые коробки с мягкими (резиновыми) уплотнительными прокладками. Коробки герметизируются для защиты магнитопроводов от попадания в них пропиточных материалов, используемых при изготовлении трансформатора, которые могут вызвать механические деформации магнитопровода при колебаниях окружающей температуры.

Для обмоток трансформаторов питания чаще всего применяются провода круглого или прямоугольного сечения с высокопрочной эмалевой изоляцией марки ПЭВ. Провода прямоугольного сечения (например, марки ПЭТВП) применяют только при больших токах обмоток (свыше 15–20 А). В некоторых случаях при высоких рабочих напряжениях применяют провода с комбинированной изоляцией: с эмалешелковой (ПЭШО, ПЭШД) и с эмалехлопчатобумажной (ПЭБО, ПЭБД). Такая изоляция повышает электрическую прочность обмоток, но уменьшает коэффициент заполнения окна

Таблица 1.1

Провод обмоточный медный марки ПЭВ-2

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение, мм ²	Сопротивление 100 м провода, Ом	Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение, мм ²	Сопротивление 100 м провода, Ом
0,050	0,00196	879,08	0,75	0,442	3,90
0,063	0,00312	552,24	0,80	0,503	3,43
0,071	0,00396	435,10	0,85	0,567	3,04
0,080	0,00503	342,54	0,90	0,636	2,71
0,090	0,00636	270,91	0,95	0,709	2,43
0,100	0,00785	219,49	1,00	0,785	2,19
0,112	0,00985	174,89	1,06	0,882	1,95
0,125	0,01227	140,40	1,12	0,985	1,75
0,140	0,01539	111,93	1,18	1,094	1,58
0,160	0,02011	85,69	1,25	1,227	1,40
0,180	0,02545	67,71	1,32	1,368	1,26
0,200	0,03142	54,84	1,40	1,539	1,12
0,224	0,03941	43,72	1,50	1,767	0,98
0,250	0,04909	35,10	1,60	2,011	0,86
0,280	0,06158	27,98	1,70	2,270	0,76
0,315	0,07793	22,11	1,80	2,545	0,68
0,355	0,09898	17,41	1,90	2,835	0,61
0,400	0,12566	13,71	2,00	3,142	0,55
0,450	0,15904	10,83	2,12	3,530	0,49
0,500	0,19635	8,78	2,24	3,941	0,44
0,560	0,24630	7,00	2,36	4,374	0,39
0,630	0,31172	5,53	2,44	4,676	0,37
0,710	0,39592	4,35	2,50	4,909	0,35

магнитопровода. В табл. 1.1 приведены стандартные диаметры проводов марки ПЭВ-2; диаметры проводов даны без изоляции.

Если провода прямоугольного сечения отсутствуют, можно использовать круглые провода меньшего сечения, при этом наматывают две или более обмоток из одинакового круглого провода с одинаковым числом витков, равным расчетному. Суммарное сечение проводов этих обмоток должно быть возможно ближе к расчетному; все эти одинаковые обмотки соединяют параллельно.

После намотки катушки и закрепления выводов на лепестках (или на других выводных приспособлениях) катушка обычно об-

матывается несколькими слоями изоляционной бумаги или хлопчатобумажной ленты для защиты от механических повреждений и для улучшения электрической изоляции.

Для придания влагостойкости и создания монолитности катушки после намотки пропитываются специальными лаками и компаундами (например, марки ЭД-6). Высоковольтные трансформаторы (с напряжением несколько тысяч вольт) помещают целиком в трансформаторное масло, которое является хорошим изолятором, предохраняющим от пробоев, и одновременно хорошим проводником теплоты, улучшающим охлаждение трансформатора.

Для защиты трансформаторов от внешних воздействий (влаги, инея, росы, тумана, пыли) принимают различные меры в зависимости от интенсивности и продолжительности этих воздействий. При наиболее тяжелых внешних условиях применяют вакуумную герметизацию, при которой катушку и магнитопровод помещают в металлический кожух и заливают компаундом. Для менее трудных условий работы производят обволакивание (капсулирование) всего трансформатора слоем компаунда толщиной 1–3 мм. Для уменьшения массы можно покрывать компаундом не всю поверхность трансформатора, а защищать только наиболее уязвимые места – торцы катушек, места выхода контактов, зазоры между магнитопроводом и катушкой. Остальные поверхности покрывают влагостойкой эмалью и покровным лаком.

Для аппаратуры, работающей в комнатных условиях, достаточно пропитать катушку или весь трансформатор специальным лаком, обеспечивающим защиту, достаточную для этих условий. Все способы защиты трансформаторов от внешних воздействий одновременно обеспечивают монолитность, а, следовательно, и нужную механическую прочность конструкции.

1.6. Основные определения и расчетные соотношения

Для полного расчета трансформатора необходимо выполнить сначала электрический, а затем конструктивный расчеты. Электрический расчет заключается в выборе схемы трансформатора, определении напряжений и токов обмоток, нахождения коэффициентов трансформации мощности обмоток и габаритной мощности трансформатора. После конструктивного расчета уточняются падения напряжения в обмотках и потери в магнитопроводе и в меди, которые на этапе электрического расчета определяются приближенно.

Коэффициентом трансформации трансформатора n называется отношение числа витков вторичной обмотки ω_1 к числу витков первичной обмотки ω_2 . Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то различают несколько коэффициентов трансформации: n_2, n_3 , определяемых как отношение чисел витков соответствующих обмоток $\omega_2, \omega_3, \dots$ к числу витков первичной обмотки. На основании первого основного закона трансформации можно представить коэффициенты трансформации как отношения соответствующих ЭДС:

$$n_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{E_2}{E_1}; \quad n_3 = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{E_3}{E_1}; \quad n_4 = \frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{E_4}{E_1} \dots$$

В тех случаях, когда значения ЭДС неизвестны, можно воспользоваться приближенными формулами, имея в виду, что ЭДС мало отличается от напряжения обмотки

$$n_2 \approx \frac{U_2}{U_1}; \quad n_3 \approx \frac{U_3}{U_1} \dots$$

В соответствии со вторым основным законом трансформации можно получить следующее соотношение между токами первичной и вторичной обмоток:

$$I_1 \approx I_2 n_2.$$

Знак приближенного равенства поставлен потому, что в этом выражении не учитывается ток холостого хода трансформатора. Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то ток первичной обмотки состоит из суммы токов, вызванных токами каждой вторичной обмотки:

$$I_{\text{общ.}} \approx I_{1,2} + I_{1,3} + I_{1,4} + \dots = I_2 n_2 + I_3 n_3 + I_4 n_4 + \dots$$

В этом выражении также не учитывается ток холостого хода. Сопоставляя выражения представленные выражения, легко получить известное соотношение:

$$I_{1\text{общ.}} E_1 \approx I_2 E_2 + I_3 E_3 + I_4 E_4 + \dots$$

Учитывая выше сказанное, можно записать:

$$I_{1\text{общ.}} U_1 \approx I_2 U_2 + I_3 U_3 + I_4 U_4 + \dots$$

Последние два выражения формулируются следующим образом: мощность первичной обмотки равна сумме мощностей всех

вторичных обмоток (без учета тока холостого хода). Здесь необходимо сделать важную оговорку. Когда форма тока первичной обмотки совпадает с формой тока вторичной обмотки (или с формой, полученной в результате суммирования токов всех вторичных обмоток). Это условие выполняется при нагрузке вторичных обмоток на линейные цепи, например, на цепи накала ламп, на нагревательные приборы, на двигатели переменного тока.

Если же формы токов первичной и вторичной обмоток не совпадают, то мощности этих обмоток, как правило, не равны между собой. Различная форма токов в обмотках может наблюдаться в тех случаях, когда в цепь вторичной (или первичной) обмотки включены нелинейные элементы, в частности приборы с односторонней проводимостью, – диоды, тиристоры, транзисторы. Поэтому у трансформаторов, работающих в некоторых (но не во всех!) схемах выпрямителей и транзисторных преобразователей, мощности первичной и вторичной обмоток отличаются друг от друга.

Трансформаторы характеризуются мощностью, которую они могут передать в нагрузку. Эта мощность измеряется в вольтамперах, а не в ваттах по следующей причине. Как известно, мощность в ваттах определяется произведением напряжения на силу тока и на косинус угла сдвига фаз между ними: $P = U^2 I^2 \cos\varphi$. Если нагрузка кроме активного сопротивления содержит индуктивность или емкость, то $\cos\varphi$ будет меньше единицы и действительная мощность (в ваттах), выделяемая в нагрузке, будет меньше произведения $U^2 I^2$. Однако обмотка трансформатора, имеющая напряжение U_2 , будет при этом нагружена током I^2 , независимо от значения $\cos\varphi$. Иначе говоря, трансформатор может отдать в нагрузку ток I^2 при напряжении U^2 независимо от того, какова будет действительная мощность, выделяемая в нагрузке. Поэтому произведение $U^2 I^2$, называемое полной мощностью и измеряемое в вольтамперах (В·А), характеризует трансформатор с точки зрения мощности, которую он может отдать в нагрузку. Габаритные размеры трансформатора зависят от так называемой габаритной мощности трансформатора, которая равна полусумме мощностей всех его обмоток:

$$P_{\text{габ.}} = \frac{1}{2}(U_1 I_{1\text{общ}} + U_2 I_2 + U_3 I_3 + \dots).$$

Очевидно, что если трансформатор имеет две обмотки, мощности которых равны между собой, то габаритная мощность такого

трансформатора будет равна мощностям первичной или вторичной обмоток:

$$P_{\text{габ}} = U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Если трансформатор имеет отводы от первичной обмотки (например, для включения в сеть 127 или 220 В) или от вторичных обмоток, то для расчета габаритной мощности следует подставлять мощности всех частей обмоток, находящихся между отводами трансформатора, независимо от того, работают ли они в данном случае или нет. Конструктивный расчет трансформатора заключается в выборе магнитопровода и определении чисел витков обмоток и диаметров проводов. Основное соотношение, связывающее число витков с напряжением и другими параметрами трансформатора, имеет вид:

$$\omega = \frac{E \cdot 10^4}{4,44 f B Q_c k_c},$$

где f – частота питающей сети, Гц; B – магнитная индукция в магнитопроводе, Тл; Q_c – полное сечение стержня магнитопровода, см²; k_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

Индукция B представляет собой число линий магнитного потока, Φ , проходящих через один квадратный сантиметр сечения магнитопровода, единицей магнитной индукции является тесла (Тл). Значения B выбирают чаще всего в пределах от 0,8 до 1,2 Тл. Чем больше мощность трансформатора, тем меньшее значение индукции надо выбирать. Значения B в зависимости от некоторых параметров трансформатора приведены в табл. 1.2. Увеличение индукции B свыше рекомендуемых значений ведет к перегреву трансформатора. При $f = 50$ Гц обычно используется электротехническая сталь толщиной 0,35–0,6 мм, а при $f = 400$ Гц 0,08–0,2 мм. Коэффициент k_m дан для проводов с эмалевой изоляцией; для проводов с шелковой или хлопчатобумажной изоляцией снижается в 1,2–1,5 раза.

Сечение стержня Q_c определяют как:

– для магнитопроводов стержневого и броневые типов

$$Q_c = a \cdot c.$$

– для кольцевых магнитопроводов

$$Q_c = (D - d) \frac{c}{2}.$$

Таблица 1.2

**Рекомендуемые значения индукции, плотности тока,
КПД и коэффициента заполнения окна**

Габаритная мощность $P_{\text{габ}}, \text{В} \cdot \text{А}$	Индукция B , Тл		Плотность тока J , $\text{А}/\text{мм}^2$		КПД η		Коэффициент заполнения окна k_m
	Частота сети f		Частота сети f		Частота сети f		
	50 Гц	500 Гц	50 Гц	500 Гц	50 Гц	500 Гц	
10	1,1	1,0	4,8	7,0	0,82	0,80	0,23
20	1,3	1,1	3,9	6,0	0,85	0,83	0,26
40	1,4	1,2	3,2	5,0	0,87	0,85	0,28
70	1,4	1,3	2,8	4,2	0,89	0,87	0,30
100	1,4	1,2	2,5	3,8	0,91	0,89	0,31
200	1,3	1,1	2,0	3,1	0,93	0,91	0,32
400	1,2	1,0	1,6	2,5	0,85	0,92	0,33
700	1,1	0,9	1,3	2,1	0,96	0,93	0,33
1000	1,1	0,8	1,2	1,8	0,96	0,93	0,34

Коэффициент заполнения магнитопровода сталью k_c показывает, какую часть полного сечения стержня Q_c занимает магнитный материал (сталь). Имеется в виду, что остальная часть сечения приходится на изоляцию пластин или ленты. Для трансформаторов из материала толщиной не менее 0,08 мм:

$$k_c = \frac{Q_{\text{стали}}}{Q_c} = 0,85 \div 0,95.$$

Для кольцевых магнитопроводов из тонкой ленты:

$$k_c = 0,74 \div 0,75.$$

Из этого можно сделать некоторые важные выводы. Во-первых, число витков ω пропорционально ЭДС соответствующей обмотки E ; во-вторых, чем больше частота сети f и сечение стержня магнитопровода Q_c , тем меньше витков будут иметь обмотки. Для трансформаторов питания, работающих от сети с частотой 50 Гц, формулу можно значительно упростить:

$$\omega \approx 45 \frac{E}{Q_c}.$$

Так как при расчете трансформатора обычно задают напряжение обмоток U , а не ЭДС E , то в первом приближении можно воспользоваться выражениями:

– для первичной обмотки $E_1 = 0,95U_1$;

– для вторичных обмоток $E_2 = 1,05U_2$.

Диаметр проводов обмоток (без изоляции) определяют из выражения:

$$d = 1,13\sqrt{\frac{I}{J}},$$

где d – диаметр провода без изоляции, мм; I – ток, текущий по обмотке, А; J – плотность тока в обмотках, измеряемая в амперах на квадратный миллиметр сечения провода (без изоляции), А/мм².

Значения допустимых плотностей тока J , зависящие от мощности трансформатора питания и других его параметров, приводятся в табл. 1.2.

При увеличении плотности тока свыше допустимой трансформатор будет перегреваться. Для маломощных трансформаторов, работающих от сети с частотой 50 Гц, можно воспользоваться приближенной формулой:

$$d \approx 0,7\sqrt{I}.$$

Выбор магнитопровода производится с помощью выражения:

$$Q_c Q_o = \frac{P_{\text{раб}} \cdot 10^2}{2,22fB\eta s k_c k_m},$$

где Q_o – площадь окна магнитопровода, приходящаяся на обмотки одного стержня, см²; η – коэффициент полезного действия трансформатора; s – число стержней, несущих обмотки; k_m – коэффициент заполнения окна медью обмотки. Остальные обозначения известны из предыдущего текста.

Площадь окна Q_o магнитопроводов стержневого и броневого типов

$$Q_o = b \cdot h.$$

Площадь окна Q_o кольцевых сердечников

$$Q_o = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора η , представляющий собой отношение отдаваемой мощности к потребляемой, обычно довольно высока и лежит в пределах 0,85–0,95, чем больше мощность трансформатора, тем выше его КПД.

Число стержней s трансформатора броневых типа равно единице, стержневого типа (с двумя катушками) – двум и трехфазного – трем. Для тороидальных трансформаторов $s = 1$. Магнитопроводы стержневого типа ($s = 2$) обычно применяют при мощностях более 250–300 В·А и частоте сети 50 Гц, а также в тех случаях, когда нужно улучшить охлаждение обмоток.

Коэффициент заполнения окна k_m показывают, какую часть площади окна магнитопровода занимает чистая медь проводов обмотки (без изоляции). Так как кроме изоляции проводов (обычно эмалированных) катушка имеет межслоевую и межобмоточную изоляцию, а намотка производится на гильзу или на каркас, то все эти виды изоляции занимают значительную часть площади окна и коэффициент заполнения окна медью получается небольшим

$$k_m = \frac{Q_{\text{меди}}}{Q_o} = 0,25 \div 0,35.$$

Обычно чем больше мощность трансформатора, тем больше k_m . Значения КПД и коэффициента заполнения окна, зависящие от некоторых параметров трансформатора, приведены в табл. 1.2.

Если маломощный трансформатор работает от сети с частотой 50 Гц, то равенство можно упростить следующим образом:

– для трансформаторов броневой конструкции:

$$Q_c Q_o \approx 1,15 P_{\text{габ}}.$$

– для трансформаторов стержневой конструкции:

$$Q_c Q_o \approx 0,6 P_{\text{габ}}.$$

Значение габаритной мощности $P_{\text{габ}}$ в формулах, указывается в вольт-амперах.

Зная произведение $Q_c Q_o$, можно выбрать стандартный магнитопровод, при этом выбранный магнитопровод должен иметь произведение $Q_c Q_o$ не меньше расчетного значения. Если имеется возможность изготовить пластины из трансформаторной стали, то размеры магнитопровода можно определить с помощью формул, в которых все линейные размеры указаны в сантиметрах (см. рис. 1.3):

$$a \approx 0,74 \sqrt[4]{Q_c Q_o}; \quad b = a; \quad c = 1,5a; \quad h = 2,5a.$$

Так как сечение стержня Q_c и площадь окна Q_o в конечном счете определяют габаритные размеры трансформатора, то выражение:

$$Q_c Q_o = \frac{P_{\text{габ}} \cdot 10^2}{2,22fB\eta sk_c k_m},$$

показывает связь этих размеров с параметрами трансформатора. Ввиду того, что рекомендуемые значения индукции B и плотности тока J лежат в сравнительно узких пределах, основное влияние на габаритные размеры оказывают габаритная мощность трансформатора $P_{\text{габ}}$ и частота питающей сети f . С увеличением $P_{\text{габ}}$ размеры трансформатора растут, а с увеличением f снижаются. Последнюю (частотную) зависимость часто используют для уменьшения массы и объема специальной аппаратуры. Так, источники вторичного электропитания самолетной аппаратуры, для которых

уменьшение массы и габаритов играет весьма существенную роль, питаются от специальных самолетных генераторов, которые вырабатывают переменное напряжение с частотой 400 Гц. Такое повышение частоты (по сравнению с частотой 50 Гц) не только значительно уменьшает массу трансформаторов (в 4–5 раз), но также резко снижает массу и объем сглаживающих фильтров выпрямителей.

После конструктивного расчета трансформатора по приближенным формулам полезно проверить коэффициент заполнения окна медью k_m . Для трансформаторов броневой и стержневой конструкций:

$$k_m = 8 \cdot 10^{-3} \frac{d_1^2 \omega_1 + d_2^2 \omega_2 + d_3^2 \omega_3 + \dots}{Q_o}.$$

Для проводов с эмалевой изоляцией значение k_m не должно превышать 0,3.

Для тороидальных трансформаторов на кольцевых магнитопроводах с внутренним диаметром d :

$$k_m = \frac{d_1^2 \omega_1 + d_2^2 \omega_2 + d_3^2 \omega_3 + \dots}{100d^2}.$$

В этом случае коэффициент k_m не должен превышать 0,2.

Если рассчитанные по формулам коэффициенты заполнения превышают указанные значения, то это указывает на трудность (или невозможность) размещения обмоток в окне магнитопровода. В таком случае следует сделать перерасчет трансформатора для уменьшения числа витков или диаметра проводов обмоток; для

этого можно немного увеличить индукцию B , или плотность тока J , или то и другое вместе.

1.7. Энергетические характеристики

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется отношением мощности P_2 , отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности P_1 , потребляемой из сети:

$$\eta = P_2/P_1.$$

Коэффициент полезного действия характеризует эффективность преобразования напряжения в трансформаторе.

При практических расчетах коэффициент полезного действия трансформатора вычисляют по формуле

$$\eta = 1 - (\sum P/P_1),$$

где $\sum P = P_{\text{эл}} + P_{\text{мг}}$ – полные потери в трансформаторе. Эта формула менее чувствительна к погрешностям в определении P_1 и P_2 и поэтому позволяет получить более точное значение коэффициента полезного действия.

Полезная мощность, отдаваемая трансформатором в сеть, вычисляется по формуле

$$P_2 = mU_2 I_{2\text{н}} \beta \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2,$$

где $\beta = I_2/I_{2\text{н}}$ – коэффициент нагрузки трансформатора, $I_2, I_{2\text{н}}$ – реальный и номинальный токи вторичной обмотки трансформатора.

Электрические потери в обмотках определяются из опыта короткого замыкания трансформатора

$$P_{\text{эл}} = \beta^2 P_{\text{к}},$$

где $P_{\text{к}} = r_{\text{к}} I_{1\text{н}}^2$ – потери короткого замыкания при номинальном токе.

Потери в стали $P_{\text{мг}}$ определяются из опыта холостого хода $P_{\text{мг}} = P_0$. Они принимаются постоянными для всех рабочих режимов работы трансформатора, так как при $u_1 = \text{const}$ ЭДС E_1 в рабочих режимах меняется незначительно.

Исходя из всего вышесказанного, коэффициент полезного действия трансформатора можно определить по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}}.$$

Анализ этого выражения показывает, что коэффициент полезного действия трансформатора имеет максимальное значение при нагрузке, когда потери в обмотках равны потерям в стали.

1.8. Схемы замещения трансформаторов

Одним из средств изучения работы трансформатора является эквивалентная схема замещения, в которой магнитная связь между обмотками трансформатора замещена электрической связью, а параметры вторичной обмотки приведены к числу витков первичной (рис. 1.4).

Так как в приведенном трансформаторе $k = 1$, то и $-E_1 = E_2$. В результате точки a_1 и a_2 , b_1 и b_2 имеют одинаковый потенциал, поэтому на схеме их можно соединить, получив тем самым Т-образную схему замещения трансформатора.

Параметры r_1, x_1 – активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки, соответственно, r'_2, x'_2 , – приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений вторичной обмотки, соответственно, Z_H – полное сопротивление нагрузки.

Магнитный поток не зависит от нагрузки, поэтому его представляют как индуктивное сопротивление x_0 , активное сопротивление r_0 , которое обусловлено магнитными потерями и протекающий через них ток холостого хода I_0 . Эти параметры определяются в опыте холостого хода трансформатора.

Изменяя Z_H на схеме замещения, можно получить любой режим работы трансформатора. Например, при разомкнутой вторичной обмотке $Z_H = \infty$, что соответствует режиму холостого хода трансформатора, а при $Z_H = 0$ – режиму короткого замыкания. При любых других значениях Z_H – режим работы под нагрузкой. Режимы

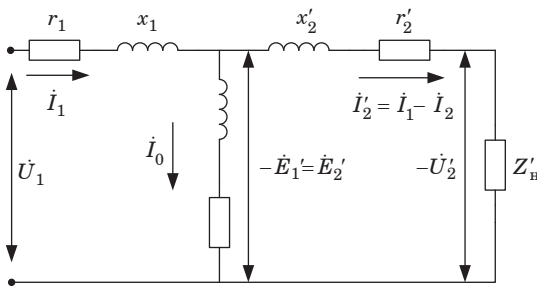


Рис. 1.4. Эквивалентная схема замещения

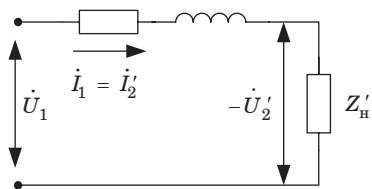


Рис. 1.5. Упрощенная схема замещения

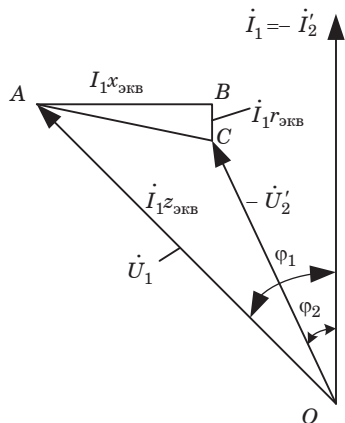
работы необходимы для определения параметров схемы замещения.

При практических расчетах, током холостого хода пренебрегают, тогда схема сводится к упрощенной (рис. 1.5).

При переходе от режима холостого хода к режиму работы под нагрузкой вторичное напряжение трансформатора изменяется. При постоянном значении первичного напряжения $U_1 = U_{1Н} = \text{const}$ разность между вторичными напряжениями в этих режимах называется процентным изменением вторичного напряжения трансформатора и равна:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\% = \frac{k_{12}U_{20} - k_{12}U_2}{k_{12}U_{20}} \cdot 100\% = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \cdot 100\%.$$

Так как при холостом ходе падение напряжения в обмотках трансформатора отсутствует, то $U_1 = U'_{20}$ и тогда при номинальном значении первичного напряжения $U_1 = U_{1Н}$



$$\Delta U = \frac{U_{1Н} - U'_2}{U_{1Н}} \cdot 100\%.$$

На рис. 1.6 представлена векторная диаграмма, построенная согласно упрощенной схеме замещения (рис. 1.5). С помощью этой диаграммы можно найти изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке.

В самом деле, из-за небольшого сдвига фаз между $U_{1Н}$ и U'_2 ($\varphi_1 - \varphi_2 = 3-5^\circ$) за модуль вектора $U_{1Н}$ можно принять его проекцию (отрезок OA) на направление вектора U'_2

Рис. 1.6. Упрощенная векторная диаграмма

(рис. 1.7). Разность между этой проекцией и вектором U'_2 (отрезок ОС) равна изменению напряжения $\Delta u = U_1 - U'_2 = OA - OC = AC$. Затем, спроецировав векторы $I_1 r_k$ и $jI_1 X_k$ на направление вектора U'_2 имеем

$$\Delta U = \overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC} = I_1 r_{\text{ЭКВ}} \cos \varphi_2 + I_1 x_{\text{ЭКВ}} \sin \varphi_2.$$

Тогда процентное изменение вторичного напряжения

$$\Delta u \% = \left(\frac{I_1 r_{\text{ЭКВ}}}{U_{1\text{H}}} \cos \varphi_2 + \frac{I_1 x_{\text{ЭКВ}}}{U_{1\text{H}}} \sin \varphi_2 \right) \cdot 100\%.$$

Из этого уравнения следует, что изменение вторичного напряжения пропорционально току нагрузки: $I'_2 \approx I_1$. Вводя коэффициент нагрузки $\beta = I_2/I_{2\text{H}} \approx I_1/I_{1\text{H}}$, можно получить

$$\Delta u \% = \frac{I_1}{I_{1\text{H}}} \left(\frac{I_{1\text{H}} r_{\text{ЭКВ}}}{U_{1\text{H}}} \cos \varphi_2 + \frac{I_{1\text{H}} x_{\text{ЭКВ}}}{U_{1\text{H}}} \sin \varphi_2 \right) \cdot 100\%,$$

или $\Delta u \% = \beta (u_{\text{ка}} \% \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \% \sin \varphi_2),$

т. е. изменение вторичного напряжения пропорционально коэффициенту нагрузки β .

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки I_2 при $U_1 = U_{1\text{H}} = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$ и $f = f_{\text{H}} = \text{const}$. Для построения внешних

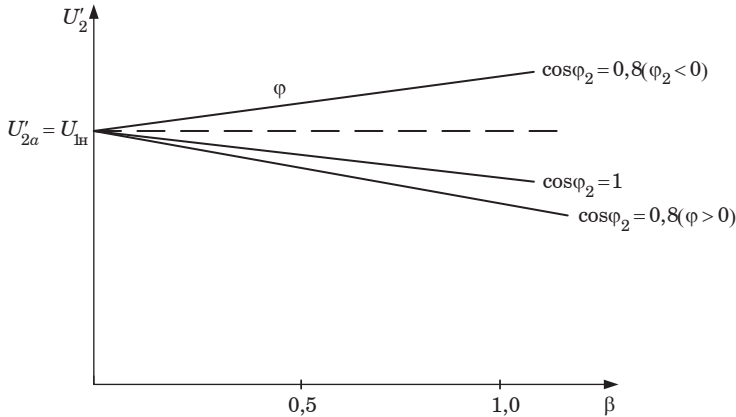


Рис. 1.7. Внешние характеристики

характеристик используют полученное согласно приведенным выражениям уравнение

$$U'_2 = U_{1н} (1 - \Delta u\%/100) = U_{1н} \left[1 - \beta (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2) / 100 \right].$$

Из рис. 1.7 видно, что внешние характеристики трансформатора практически прямолинейны, если коэффициент нагрузки находится в пределах от 0 до 1. Кривая 1 соответствует чисто активной нагрузке ($Z_{н} = r_{н}$) и $\cos \varphi_2 = 1$, кривая 2 – активно-индуктивной нагрузке ($Z_{н} = r_{н} + jx_{н}$), $\cos \varphi_2 = 0,8$ при $\varphi_2 > 0$, а кривая 3 – активно-емкостной нагрузке ($Z_{н} = r_{н} - jx_{н}$) и $\cos \varphi_2 = 0,8$ при $\varphi_2 < 0$. При $0 < \beta < 1$ напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора изменяется лишь на несколько процентов, обеспечивая практически стабильное напряжение.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Назовите сферы применения силовых трансформаторов.
2. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея, на каком принципе он основан?
3. Какие направления имеют ЭДС первичной и вторичной обмоток? Каким образом ЭДС соотносятся с приложенным напряжением и числом витков в обмотках?
4. Сформулируйте правило Ленца, объясните данное явление на примере трансформатора.
5. Каким образом добиваются правильной циркуляции токов в обмотках реального трансформатора?
6. Назовите различия идеального и реального трансформаторов.
7. Какие соотношения имеют токи и ЭДС вторичной и первичной обмоток нагруженного трансформатора?
8. Каким образом в трансформаторах уменьшают потери на вихревые токи?
9. Что такое коэффициент трансформации? Запишите основные выражения для его расчета.
10. За счет чего снижают габариты электромеханических устройств?
11. Что такое коэффициент заполнения окна медью? Назовите пределы его значений.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ К 1 РАЗДЕЛУ

Практическая работа № 1. Расчет однофазного трансформатора

Однофазный трансформатор малой мощности характеризуется следующими номинальными величинами: мощность $S_{\text{н}}$, первичное напряжение $U_{1\text{н}}$, вторичное напряжение $U_{2\text{н}}$, процентное значение тока холостого хода $i_0\%$, мощность потерь в сердечнике трансформатора P_0 , процентное значение напряжения короткого замыкания $u_k\%$, мощность потерь короткого замыкания $P_{\text{кн}}$. Числовые значения заданных величин исходных данных для каждого из вариантов указаны в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Варианты для решения задачи № 1

Вариант	Тип трансформатора	$S_{\text{н}}$, ВА	$U_{1\text{н}}$, В	$U_{2\text{н}}$, В	i_0 , %	P_0 , Вт	$u_{\text{к}}$, %	$P_{\text{кн}}$, Вт
1	ОМ-0,3/6	300	6300	230	30	23	8	20
2	ОМ-0,66/6	660	6000	230	20	25	8	46
3	ОМ-1,2/6	1200	5150	230	20	32	7	66
4	ОМ-0,66/10	660	10500	230	30	25	8	46
5	ОМ-1,2/10	1200	10000	230	20	32	7	66
6	ОМ-1,2/6	1200	5700	115	20	32	7	66
7	ОМ-1,2/6	1200	5400	115	20	32	7	66
8	ОМ-1,2/10	1200	9500	115	20	32	7	66
9	ОМ-1,2/10	1200	9000	115	20	32	7	66
10	ОМ-1,2/10	1200	8590	115	20	32	7	66
11	ОМ-0,63/6	630	6000	230	34	18	6,8	42
12	ОМ-0,63/10	630	10000	230	34	18	6,8	42
13	ОМ-1,25/6	1250	6000	230	23	23	6	60
14	ОМ-1,25/10	1250	10000	230	23	23	6	60
15	ОМ-0,3/6	630	6000	115	34	18	6,8	42
16	ОМ-0,63/10	630	10000	115	34	18	6,8	42
17	ОМ-1,25/6	1250	600	115	23	23	6	60
18	ОМ-1,25/10	1250	1000	115	23	23	6	60
19	ПОБС-2АУЗ	300	220	17,6	14	20	12	20
20	ПОБС-3АУЗ	300	220	247,5	14	20	10	25
21	ПОБС-5АУЗ	300	220	44	14	18	11	20
22	ПРТ-АУЗ	65	220	12	4,4	3	15	5

Вариант	Тип трансформатора	S_H , ВА	U_{1H} , В	U_{2H} , В	i_0 , %	P_0 , Вт	u_k , %	$P_{кн}$, Вт
23	ПТ-25АУЗ	65	220	60	4,4	3	14	4
24	ПТИУЗ	80	220	11,2	27	4,5	13	4
25	СОБСЗА	50	110	82,6	8	3	12	3
26	СТ-3	13	110	13	53	1	25	2
27	СТ-2	25	165	13	27	2	18	2
28	СТ-3	13	220	13	42	1,5	17	1,5
29	СКТ-1	12	220	165	50	3	17	1
30	СТ-2	25	165	13	29	1	15	2

Определить:

1. Коэффициент трансформации трансформатора k , номинальные токи первичной I_{1H} и вторичной I_{2H} обмоток.

2. Начертить схему замещения трансформатора и определить параметры Т-образной схемы замещения.

3. КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$. На основании расчетов построить зависимость $\eta = f(\beta)$.

4. Процентное изменение вторичного напряжения $\Delta u\%$ и вторичное напряжение U_2 при $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$. На основании расчетов построить зависимость $U_2 = f(\beta)$.

5. Характер нагрузки, при котором вторичное напряжение не зависит от коэффициента β .

Пример. Однофазный трансформатор малой мощности характеризуется следующими номинальными величинами: мощность $S_H = 250$ ВА, первичное напряжение $U_{1H} = 220$ В, вторичное напряжение $U_{2H} = 24$ В, процентное значение тока холостого хода $i_0 = 20\%$, мощность потерь в сердечнике трансформатора $P_0 = 10$ Вт, процентное значение напряжения короткого замыкания u_k составляет 7% , мощность потерь короткого замыкания $P_{кн} = 15$ Вт.

Решение:

Коэффициент трансформации однофазного трансформатора

$$k = U_{1H}/U_{2H} = 220/24 = 9,17.$$

Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1H} = S_H/U_{1H} = 250/220 = 1,14 \text{ А.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки

$$I_{2H} = S_H/U_{2H} = 250/24 = 10,42 \text{ А.}$$

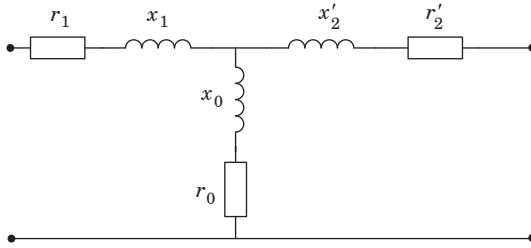


Рис. 1.8. Т-образная схема замещения однофазного трансформатора

Т-образная схема замещения однофазного трансформатора приведена на рис. 1.8.

Определение параметров схемы замещения начинаем с расчёта тока холостого хода

$$I_0 = \frac{i_0 \cdot I_{\text{H}}}{100} = \frac{20}{100} \cdot 1,14 = 0,23 \text{ А.}$$

Тогда полное сопротивление намагничивающей ветви:

$$z_0 = U_{1\text{H}} / I_0 = 220 / 0,23 = 956,5 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление намагничивающей ветви

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{10}{0,23^2} = 189,04 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{956,5^2 - 189,04^2} = 937,63 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{\text{K}} = \frac{u_{\text{k}}}{100} \frac{U_{1\text{H}}^2}{S_{\text{H}}} = \frac{7}{100} \cdot \frac{220^2}{250} = 13,55 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_{\text{K}} = P_{\text{K}} / I_{1\text{H}}^2 = 15 / 1,14^2 = 11,62 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{\text{K}} = \sqrt{z_{\text{K}}^2 - r_{\text{K}}^2} = \sqrt{13,55^2 - 11,62^2} = 6,98 \text{ Ом.}$$

Активные сопротивления обмоток приведенного трансформатора

$$r_1 = r_2' = r_{\text{K}} / 2 = 11,62 / 2 = 5,81 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора

$$x_1 = x'_2 = x_k/2 = 6,98/2 = 3,49 \text{ Ом.}$$

Сопротивления вторичной обмотки реального трансформатора

$$r_2 = r'_2/k^2, \quad x_2 = x'_2/k^2.$$

КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$ можно определить из выражения (1.6):

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}}{\beta S_{\text{н}} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}}.$$

Результаты расчета КПД представлены в табл. 1.4.

На основании результатов расчета, представленных в табл. 1.4, построим зависимость $\eta = f(\beta)$, представленную на рис. 1.9.

Процентное изменение вторичного напряжения $\Delta u\%$ и вторичное напряжение U_2 при $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ для активно-индуктивной нагрузки $\cos\varphi_2 = 0,8$ определяем, используя выражение (1.9), (1.10):

$$\Delta u\% = \beta \left(\frac{I_{1\text{н}} \cos\varphi_2 + I_{1\text{н}} x_k \sin\varphi_2}{U_{1\text{н}}} \right) \cdot 100\%, \quad U_2 = \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100\%} \right) U_{2\text{н}}.$$

Таблица 1.4

Результаты расчета КПД

β	0	0,25	0,5	0,75	1
η	0	0,82	0,88	0,89	0,89

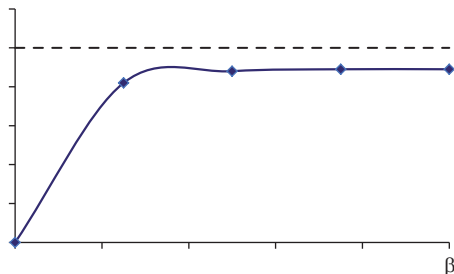


Рис. 1.9. Зависимость $\eta = f(\beta)$

Результаты расчета КПД

β	0	0,25	0,5	0,75	1
$\Delta u\%$	0	1,74	3,48	5,22	6,96
$U_2, \text{В}$	24	23,58	23,16	22,75	22,33

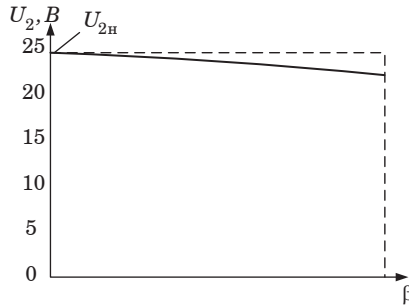


Рис. 1.10. Внешняя характеристика однофазного трансформатора

На основании результатов расчета, представленных в табл. 1.5, построим зависимость $U_2 = f(\beta)$, представленную на рис. 1.10.

Напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки не будет зависеть от коэффициента нагрузки β при выполнении условия

$$I_{1H} r_K \cos \varphi_2 + I_{1H} x_K \sin \varphi_2 = 0,$$

значит,

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = -r_K / x_K.$$

Отрицательный знак в правой части уравнения указывает на активно-емкостной характер нагрузки, а величина угла

$$\varphi_2 = -\arctg(r_K / x_K) = -\arctg(11,62/6,98) = -59^\circ.$$

Практическая работа № 2. Расчет сердечника трансформатора

Имеется трансформатор с заданными входным, выходным напряжениями и выходным током. Габариты Ш-образного сердечника магнитопровода заданы шириной керна a , шириной окна b , толщиной пакета c и высотой окна h . КПД задать в пределах 0,85 – 0,95. Числовые значения заданных величин исходных данных для каждого из вариантов указаны в табл. 1.6.

Вычислить:

1. Напряжения и ЭДС обмоток с поправкой на проседание напряжения.
2. Действующие значения токов первичной и вторичной обмотках.
3. Габаритную мощность трансформатора.
4. Произведение площадей сердечника и окна, из которых определить, удовлетворяют ли заданные размеры для обеспечения требуемой габаритной мощности.
5. Число витков первичной и вторичной обмоток.
6. Диаметры медных проводов, затем выбрать по справочным данным табл. 1.1.
7. Коэффициент заполнения медью, сравнить с теоретическим (допустимые значения коэффициента заполнения медью приведено в п. 1.6).

Таблица 1.6

Варианты для решения задачи № 2


№ Варианта	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	a	b	c	h
1	400	220	1	5	4	5	6,5
2	220	127	0,7	4	3,2	4	5,2
3	220	24	0,8	2,5	2	2,5	3,3
4	380	36	1,1	2,5	2	2,5	3,3
5	1000	400	2	7	6	7	9,5
6	6000	1000	2,2	10	8	10	13
7	1000	600	1,6	7	6	7	9,5
8	1000	100	1,4	4	3,2	4	5,2
9	380	127	0,8	4	3,2	4	5,2
10	36	127	0,9	4	3,2	4	5,2
11	400	127	0,9	4	3,2	4	5,2
12	400	220	1	5	4	5	6,5
13	380	24	1,3	2,5	2	2,5	3,3
14	600	380	1	6	5	6	8
15	127	60	1,2	3	2,5	3	4
16	220	60	1,3	4	3,2	4	5,2
17	24	127	0,8	4	3,2	4	5,2
18	1000	350	2,5	7	6	7	9,5
19	690	100	1,2	4	3,2	4	5,2
20	630	380	1,7	7	6	7	9,5

№ Варианта	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	a	b	c	h
21	220	100	2,3	5	4	5	6,5
22	220	60	4,1	5	4	5	6,5
23	127	60	3,8	5	4	5	6,5
24	127	36	5,3	5	4	5	6,5
25	110	24	3,2	4	3,2	4	5,2
26	110	36	5,0	5	4	5	6,5
27	115	24	6,2	4	3,2	4	5,2
28	36	12	1,5	2,5	2	2,5	3,3
29	310	12	2,3	2,5	2	2,5	3,3
30	120	36	4,3	4	3,2	4	5,2

Пример. В качестве примера рассмотрим расчет трансформатора со следующими характеристиками (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Исходные данные

Параметр	Значение	Схема
Входное напряжение	230,0 Вольт	
Выходное напряжение	5,7 Вольт	
Выходной ток	1,0 Ампер	

В наличии имеется Ш-образный магнитопровод со следующими данными (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Параметры магнитопровода

Параметр	Значение
Ширина керна (a)	1,3 см
Ширина окна (b)	0,8 см
Толщина пакета (c)	2,8 см
Высота окна (h)	2,1 см

1) Определим напряжения и ЭДС обмоток (5% поправка на проседание напряжения):

$$E_1 = kU_{\text{вх}} = 0,95 \cdot 230 = 218,5 \text{ В.}$$

$$E_2 = kU_{\text{ВЫХ}} = 1,05 \cdot 5,7 = 5,985 \text{ В.}$$

2) Найдем действующие значения токов в обмотках:

$$I_{1,2} = I_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{E_2}{E_1} = 1 \cdot \frac{5,985}{218,5} = 0,0274 \text{ А,}$$

$$I_{\text{СУММ}} = I_{1,2} = 0,0274 \text{ А.}$$

3) Найдем габаритную мощность трансформатора:

$$P_{\text{габ}} = \frac{1}{2} \cdot (U_1 I_{1\text{общ}} + U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}}) = \frac{1}{2} \cdot (230 \cdot 0,0274 + 1 \cdot 5,7) = 6,00 \text{ ВА.}$$

4) Найдем габариты сердечника. Коэффициент заполнения сталью примем равным 0,9.

$$Q_c Q_o = \frac{P_{\text{габ}} \cdot 10^2}{2,22 f B J \eta k_c k_m} = \frac{6,00 \cdot 10^2}{2,22 \cdot 50 \cdot 1,1 \cdot 4,8 \cdot 0,82 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,23} = 6,03 \text{ см}^4.$$

5) Оценим габаритные параметры имеющегося сердечника:

$$Q_c Q_o = a \cdot b \cdot c \cdot h = 1,3 \cdot 0,8 \cdot 2,8 \cdot 2,1 = 6,11 \text{ см}^4.$$

Видно, что он подойдет, но запаса почти нет.

6) Находим число витков обмоток:

$$\omega_1 = \frac{E \cdot 10^4}{4,44 f B Q_c k_c} = \frac{218,5 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,1 \cdot 1,3 \cdot 2,8 \cdot 0,9} = 2732 \text{ витка,}$$

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \frac{E_2}{E_1} = 2732 \cdot \frac{5,985}{218,5} = 75 \text{ витков.}$$

7) Находим минимальные диаметры проводов. Значения допустимых плотностей тока J , зависящие от мощности трансформатора питания и других его параметров, приводятся в табл. 1.2.

$$d_1 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I}{J}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,0274}{4,8}} = 0,085 \text{ мм,}$$

$$d_2 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I}{J}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{1}{4,8}} = 0,52 \text{ мм.}$$

В качестве проводов возьмем ПЭВ-2 0,12 мм и 0,56 мм соответственно, так как они есть в наличии.

8) Проверяем коэффициент заполнения окна медью:

$$k_m = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_1^2 \omega_1 + d_2^2 \omega_2}{bh} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(0,12)^2 \cdot 2732 + (0,56)^2 \cdot 75}{2,1 \cdot 0,8} = 0,3.$$

Достаточно тесно, но должно поместиться.

Получаем табл. 1.9 с намоточными данными.

Таблица 1.9

Намоточные данные

Параметр	Значение
Входное напряжение	230 Вольт
Выходное напряжение	5,7 Вольт
Выходной ток	1 Ампер
Число витков первичной обмотки	2732 витка
Число витков вторичной обмотки	75 витков
Диаметр первичной обмотки по меди	0,12 мм
Диаметр вторичной обмотки по меди	0,56 мм

Практическая работа № 3.

Расчет трехфазного трансформатора

Используя приведенные в табл. 1.10 значения параметров трехфазных трансформаторов серии ТМ, определить для каждого вари-

Таблица 1.10

Исходные данные для задачи 3

Параметр	Тип трансформатора и номер варианта									
	ТМ-50/6	ТМ-100/6	ТМ-180/6	ТМ-320/6	ТМ-560/35	ТМ-750/35	ТМ-1000/6	ТМ-10/6	ТМ-320/6	ТМ-750/10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Φ_m , Вб	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_1 , шт.	1200	-	864	525	1111	-	1185	-	-	1587
w_2 , шт.	-	72	-	-	-	146	-	72	80	-
$Q_{ст}$, М ^{2*}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{1ном}$, кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{2ном}$, кВ	0,4	0,5	0,5	0,4	-	3,0	0,4	0,4	-	6,3
$k_{тр}$, о.е.	-	-	-	-	5,555	-	-	-	15	-

*Максимальное значение индукции $B_m = 1,5$ Тл для всех вариантов

анта значения параметров, величины которых не указаны в этой таблице.

Обмотки соединены по схеме Y/Y , номинальное значение частоты сети переменного тока $f_c = 50$ Гц, коэффициент заполнения сталью магнитопровода принять равным $K_c = 0,95$ (о.е.) для всех вариантов.

Пример

Пусть дано:

- 1) трансформатор ТМ-1000/35;
- 2) число витков первичной обмотки $w_1 = 1600$ (шт.);
- 3) коэффициент трансформации $k_{тр} = 5,56$ (о.е.).

Требуется определить:

- 1) максимальное значение основного магнитного потока Φ_m , Вб;
- 2) число витков вторичной обмотки w_2 , (шт.);
- 3) площадь поперечного сечения стержня $Q_{ст}$ (м²);
- 4) напряжения на первичной и вторичной обмотках с учётом схемы соединения $U_{1ном}$ и $U_{2ном}$, кВ.

Решение:

Напряжение на выводах ВН:

$$U_{1ном} = 35 \text{ (кВ)}.$$

Напряжение на выводах НН:

$$U_{2ном} = \frac{U_{1ном}}{K_{тр}} = \frac{35}{5,56} = 6,3 \text{ (кВ)}.$$

Число витков в фазной обмотке НН:

$$w_2 = \frac{w_1}{K_{тр}} = \frac{1600}{5,56} = 288 \text{ (шт.)}.$$

Максимальное значение основного магнитного потока следует искать с учётом схемы соединения обмоток при расчёте по напряжению (а не по ЭДС):

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

Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода:

$$Q_{ст} = \frac{\Phi_m}{B_m \cdot K_c} = \frac{0,057}{1,5 \cdot 0,95} = 0,04 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Практическая работы № 4. Расчет двухобмоточного трансформатора

Однофазный двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}}$ и номинальным током во вторичной цепи $I_{2\text{НОМ}}$ при номинальном вторичном напряжении $U_{2\text{НОМ}}$ имеет коэффициент трансформации $K_{\text{ТР}}$ при числе витков в обмотках w_1 и w_2 . Максимальное значение магнитной индукции в стержне B_m , а площадь поперечного сечения этого стержня $Q_{\text{СТ}}$. ЭДС в расчёте на один виток $E_{\text{ВИТ}}$.

Значения перечисленных параметров приведены в табл. 1.11.

Требуется определить не указанные в этой таблице значения параметров для каждого варианта.

Дополнительно рассчитать активную мощность трансформатора, приняв коэффициент использования активной мощности $\cos(\varphi) = 0,9$ (о. е.) для чётных вариантов и $\cos(\varphi) = 0,85$ (о. е.) – для нечётных.

Номинальное значение частоты сети переменного тока $f_c = 50$ Гц коэффициент заполнения сталью магнитопровода принять равным $K_c = 0,95$ (о.е.) для всех вариантов.

Таблица 1.11

Исходные данные для практической работы № 4

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{НОМ}}$, кВА	120	–	–	250	–	–	–	250	–	–
$U_{2\text{НОМ}}$, В	630	–	880	660	630	630	–	719	920	800
w_1 , шт.	1800	–	2944	–	–	750	–	1276	2964	–
w_2 , шт.	–	169	128	140	–	–	126	–	156	–
$K_{\text{ТР}}$, о.е.	–	15	–	9,55	15	–	12	–	–	15
$E_{\text{ВИТ}}$, В	–	6	–	–	5	–	10	–	–	10
$Q_{\text{СТ}}$, м ²	0,01793	–	0,02203	–	–	0,0398	–	0,03507	0,0189	–
B_m , Тл	1,4	1,5	–	1,55	1,45	1,5	1,48	1,35	–	1,5
$I_{2\text{НОМ}}$, А	–	140	272,73	–	158,7	174,6	190,48	–	250,0	300

Пример

Пусть дано:

- 1) номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2\text{НОМ}} = 400 \text{ В}$;
- 2) ЭДС одного витка $E_{\text{ВИТ}} = 5 \text{ В}$;
- 3) номинальный ток вторичной обмотки $I_{2\text{НОМ}} = 172 \text{ А}$;
- 3) коэффициент трансформации $K_{\text{ТР}} = 15 \text{ о.е.}$;
- 4) максимальная индукция в стержне $B_m = 1,5 \text{ Тл}$.

Требуется определить:

- 1) номинальную полную мощность трансформатора $S_{\text{НОМ}}$, кВА;
- 2) число витков вторичной и первичной обмоток w_1 и w_2 , шт;
- 3) площадь поперечного сечения стержня $Q_{\text{СТ}}$, м².

Решение:

Максимальное значение основного магнитного потока в расчёте по ЭДС одного витка:

$$\Phi_{\text{Т}} = \frac{E_{\text{ВИТ.}}}{4,44 \cdot f \cdot w} = \frac{5}{4,44 \cdot 50 \cdot 1} = 0,0225 \text{ (Вб)}.$$

Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода:

$$Q_{\text{СТ}} = \frac{\Phi_{\text{Т}}}{B_{\text{Т}} \cdot K_{\text{С}}} = \frac{0,0225}{1,5 \cdot 0,95} = 0,0158 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Число витков вторичной обмотки:

$$w_2 = \frac{U_{2\text{НОМ}}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\text{Т}}} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0225} = 80 \text{ (шт.)}.$$

Число витков первичной обмотки:

$$w_1 = w_2 K_{\text{ТР}} = 80 \cdot 15 = 1200 \text{ (шт.)}.$$

Полная номинальная мощность трансформатора:

$$S_{\text{НОМ}} = U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}} = 400 \cdot 172 = 68,8 \text{ (кВА)}.$$

Примем коэффициент использования активной мощности, равным $\cos(\varphi) = 0,85 \text{ (о. е.)}$, тогда:

$$P_{\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \cos(\varphi) = 68,8 \cdot 0,85 = 65,36 \text{ (кВт)}.$$

Практическая работы № 5.

Расчет параметров трехфазного трансформатора

Трехфазный трансформатор включен в сеть напряжением переменного тока. Пользуясь данными, указанными в табл. 1.12 рассчитать:

- 1) фазные напряжения, если группа соединения трансформатора $Y/\Delta - 11$;
- 2) фазный и линейный коэффициенты трансформации;
- 3) номинальные токи первичной и вторичной обмоток;
- 4) активные сопротивления обмоток, если при коротком замыкании трансформатора мощности первичной и вторичной обмоток равны;
- 5) напряжение на вторичной обмотке $U_{2ном}$ при активно-индуктивной нагрузке, составляющей $\beta_{нагр}$ от номинальной и $\cos(\varphi_{нагр})$;
- 6) КПД при $\cos(\varphi_{нагр})$ и нагрузке, составляющей $\beta_{КПД}$ от номинальной.

Таблица 1.12

Исходные данные для задачи 5

№	Тип трансформатора	$U_{2ном}$	P_0	$P_{кз}$	u_k	i_0	$\beta_{нагр}$	$\beta_{КПД}$	$\cos(\varphi_{нагр})$
		кВ	Вт						
1	ТМ-63/6	0,23	255	1450	4,0	2,5	50	75	0,95
2	ТМ-100/10		320	1750		2,3	55	70	0,90
3	ТМ-160/27,5		460	2450	4,5	2,1	60	95	0,80
4	ТМ-250/35		650	4900		2,0	75	80	0,85
5	ТМ-400/6		930	4600	4,0	1,9	45	90	0,75
6	ТМ-630/10		1300	6500		1,7	50	85	0,90
7	ТМ-1000/27,5		1400	10800	6,0	1,3	65	75	0,85
8	ТМ-1600/35		2600	17000		1,1	55	80	0,95
9	ТМ-2500/20		2800	24000		1,0	45	85	0,80
10	ТМ-4000/35		4200	29000		0,9	65	80	0,75

Пример:

Пусть дано:

- 1) тип однофазного трансформатора ТС-180/10 на напряжение $U_{2ном} = 0,525$ кВ.
- 2) мощность потерь холостого хода $P_0 = 1,6$ кВт.
- 3) мощность потерь короткого замыкания $P_{кз} = 3$ кВт.
- 3) напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5$ %.
- 4) ток холостого хода $i_0 = 1,7$ %.

5) коэффициент загрузки трансформатора 75 %.

6) коэффициент использования активной мощности $\cos(\varphi_{\text{нагр.}}) = 0,9$ о.е.

Требуется определить недостающие параметры.

У трансформатора ТС-180/10 первичная обмотка соединена в звезду, а вторичная – в треугольник, поэтому фазные напряжения равны:

$$U_{1\text{ф}} = \frac{U_{1\text{ном.}}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5780 \text{ (В)};$$

$$U_{2\text{ф}} = U_{2\text{ном.}} = 525 \text{ (В)}.$$

Фазный и линейный коэффициенты трансформации соответственно равны:

$$K_{\text{тр.ф.}} = \frac{U_{1\text{ф}}}{U_{2\text{ф}}} = \frac{5780}{525} \approx 11 \text{ (о. е.)};$$

$$K_{\text{тр.л}} = \frac{U_{1\text{ф}}}{U_{2\text{ф}}} = \frac{10000}{525} \approx 19 \text{ (о. е.)}.$$

Номинальные токи первичной и вторичной обмоток можно найти:

$$S_{\text{ном}} = \sqrt{3}U_{2\text{ном}}I_{2\text{ном}} \approx \sqrt{3}U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}};$$

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{1\text{ном}}} = \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 10} = 10,4 \text{ (А)};$$

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{2\text{ном}}} = \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 0,525} = 198 \text{ (А)}.$$

Находим активные сопротивления обмоток R_1 и R_2 , с учетом того, что в каждой обмотке трансформатора по три фазы и ток короткого замыкания равен номинальному току:

$$R_1 = \frac{P_{\text{к}}}{2 \cdot 3 \cdot I_{1\text{ном.ф.}}^2} = \frac{3000}{2 \cdot 3 \cdot 10,4^2} = 4,62 \text{ (Ом)};$$

$$R_2 = \frac{P_{\text{к}}}{2 \cdot 3 \cdot I_{2\text{ном.ф.}}^2} = \frac{3000}{2 \cdot 3 \cdot \frac{198^2}{3}} = 0,038 \text{ (Ом)}.$$

Найдём активную и реактивную составляющие короткого замыкания:

$$u_a = \frac{P_K}{S_{\text{НОМ}}} 100\% = \frac{3}{180} 100\% = 1,67 (\%);$$

$$u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,67^2} = 5,24 (\%).$$

Активно-индуктивная нагрузка трансформатора приводит к снижению напряжения на его вторичной обмотке, которое можно найти из формулы процентного изменения напряжения:

$$\Delta U = \left(\frac{U_{2\text{НОМ}} - U_2}{U_{2\text{НОМ}}} \right) 100\% \approx \beta (u_a \cos(\varphi_H) + u_p \sin(\varphi_H)) =$$

$$= 0,75 \cdot (1,67 \cdot 0,9 + 5,24 \cdot 0,436) = 2,84 (\%).$$

Следовательно, фактическое значение напряжения составит:

$$U_2 = U_{2\text{НОМ}} \left(1 - \frac{\Delta U}{100} \right) = 525 \left(1 - \frac{2,84}{100} \right) \approx 510 (\text{В}).$$

КПД трансформатора при заданном коэффициенте загрузки и коэффициенте мощности:

$$\eta = \frac{P_B}{P_1} 100\% = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos(\varphi_{\text{нагр}})}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos(\varphi_{\text{нагр}}) + P_0 + \beta^2 P_K} =$$

$$= \frac{0,75 \cdot 180 \cdot 10^3 \cdot 0,9}{0,75 \cdot 180 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 1600 + 0,75^2 \cdot 3000} = 97,4 (\%).$$

Практическая работа № 6. Расчет автотрансформатора

Автотрансформатор, схема которого изображена на рис. 1.11, включен в сеть с напряжением $U_{1\text{НОМ}}$. Напряжение на вторичных зажимах $U_{2\text{НОМ}}$, ток нагрузки I_2 . Обмотка имеет w_1 витков.

Определить площадь поперечного сечения провода, из которого сделана обмотка, если максимально допустимая плотность тока равна $2,5 \text{ А/мм}^2$.

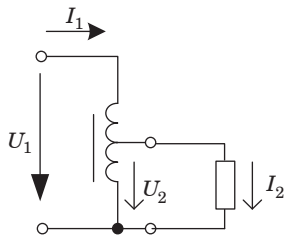


Рис. 1.11. Автотрансформатор

Исходные данные для задачи 6

№	$U_{1\text{НОМ}}$	$U_{2\text{НОМ}}$	I_2	w_1	w_2	q_1	q_1	j
	В		А	шт.		мм ²		А/мм ²
1	240	176	6	750	–	–	–	2,5
2	270	216	9	500	–	–	–	
3	310	186	20	790	–	–	–	
4	400	200	10	614	–	–	–	
5	240	126	12	400	–	–	–	
6	270	150	9	360	–	–	–	
7	310	248	5	410	–	–	–	
8	400	280	10	800	–	–	–	
9	350	250	7	595	–	–	–	
10	240	135	20	400	–	–	–	

Оценить эффективность использования автотрансформатора.

Пример

Автотрансформатор, схема которого изображена на рисунке, включен в сеть с напряжением $U_{1\text{НОМ}} = 220$ В. Напряжение на вторичных зажимах $U_{2\text{НОМ}} = 180$ В, ток нагрузки $I_2 = 10$ А. Обмотка имеет $w_1 = 500$ шт. витков.

Определить площадь поперечного сечения провода, из которого сделана обмотка, если максимально допустимая плотность тока равна $2,5$ А/мм².

Решение:

Коэффициент трансформации:

$$K_{\text{тр}} \approx \frac{U_{2\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = \frac{180}{220} = 0,818 \text{ (о. е.)}.$$

Ток, потребляемый из сети:

$$I_1 = K_{\text{тр}} I_2 = 0,818 \cdot 10 = 8,18 \text{ (А)}.$$

Число витков, к которым присоединена нагрузка:

$$w_2 = K_{\text{тр}} w_1 = 0,818 \cdot 500 = 409 \text{ (шт.)}$$

Ток, который течет по этим виткам:

$$I = I_2 - I_1 = 10 - 8,18 = 1,82 \text{ (А)}.$$

В верхней части обмотки содержится:

$$w = w_1 - w_2 = 500 - 409 = 91 \text{ (шт.)}$$

Тогда, сечение провода составит:

$$q_1 = \frac{I_1}{2,5} = \frac{8,18}{2,5} = 3,272 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Сечение провода остальной части обмотки:

$$q_2 = \frac{I}{2,5} = \frac{1,18}{2,5} = 0,472 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Если при прочих равных условиях изготовить не автотрансформатор, а трансформатор, то первичная обмотка из 500 витков имела бы сечение $q_1 = 3,272 \text{ (мм}^2\text{)}$, а вторичная из 409 витков:

$$q_2 = \frac{I_2}{2,5} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Таким образом, автотрансформаторная схема позволяет сэкономить значительное количество меди при изготовлении обмоток (81,8 %).

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Принцип действия

Электрическая машина, действие которой основано на использовании явления электромагнитной индукции, предназначена для преобразования механической энергии в электрическую, или электрической в механическую, или электрической энергии в электрическую энергию другого рода тока, другого напряжения, другой частоты.

Электрическую машину, преобразующую механическую энергию в электрическую, называют генератором. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется двигателями.

Любая электрическая машина может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Свойство электрических машин изменять направление преобразуемой энергии называют обратимостью.

Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов (рис. 2.1) N и S поместить проводник и под действием какой-либо силы F_1 перемещать его, то в нем возникнет ЭДС.

По закону электромагнитной индукции ЭДС, наводимая в проводнике длиной l , движущемся со скоростью v в однородном магнитном поле:

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot \sin(\alpha)$$

где B – магнитная индукция в месте нахождения проводника; l – активная длина проводника (его часть, находящаяся в магнитном

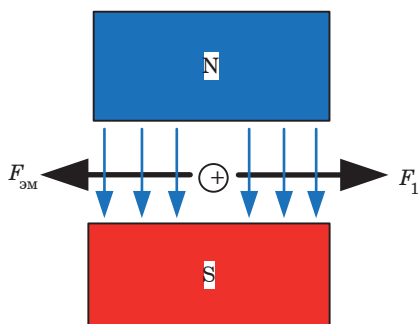


Рис. 2.1. Принцип действия электрической машины

поле); v – скорость перемещения проводника в магнитном поле; α – угол между векторами максимума магнитной индукции и скорости перемещения проводника (в рассматриваемом случае $\alpha = \pi/2$, т. е. $\sin(\alpha) = 1$).

Направление ЭДС, индуцируемой в проводнике, определяется согласно правилу правой руки (рис. 2.2, а). Если проводник замкнуть на какое-либо сопротивление приемника энергии, то в образовавшейся цепи под действием ЭДС протекает ток I , направление которого совпадает с направлением ЭДС проводника.

В результате взаимодействия тока проводника с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила $F_{\text{эм}} = BI$ направление, которой определяется по правилу левой руки (рис. 2.2, б). Эта сила направлена встречно силе F_1 , и при $F_{\text{эм}} = F_1$ проводник перемещается с постоянной скоростью. Таким образом, механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в электрическую, отдаваемую сопротивлению внешнего приемника электрической, энергии, т. е. машина будет работать в режиме генератора.

Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике и магнитного поля полюсов создается электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$, под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии, т. е. машина будет работать как двигатель.

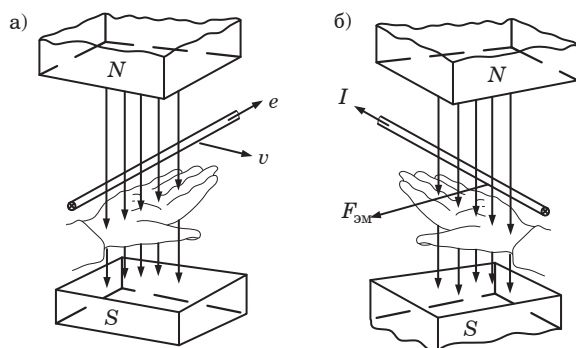


Рис. 2.2. К иллюстрации правил:
 а – правой руки (определение направления ЭДС вращения e);
 б – левой руки (определение направления электромагнитной силы $F_{\text{эм}}$)

В силу общности законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил любая электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

2.2. Устройство коллекторной машины постоянного тока

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – ротора, в котором происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую (генератор) или наоборот – электрической энергии в механическую (электродвигатель).

В машинах постоянного тока ротор является якорем, так как якорем в электротехнике принято называть ту часть электрической машины, в которой наводится ЭДС. Между неподвижной и вращающейся частями имеется зазор. Конструкция ДПТ представлена на рис. 2.3.

Статор. Неподвижная часть генератора постоянного тока состоит из станины 6, главных полюсов 4, предназначенных для соз-

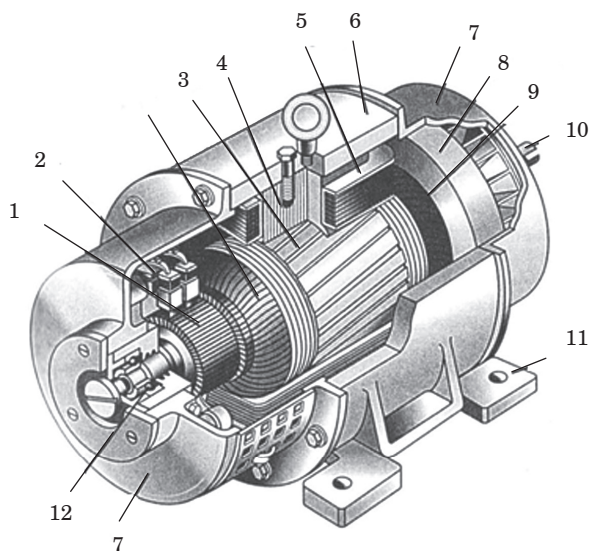


Рис. 2.3. Конструкция двигателя постоянного тока: 1 – коллектор, 2 – щетки, 3 – сердечник якоря, 4 – сердечник полюса, 5 – катушка возбуждения, 6 – станина, 7 – подшипниковые щиты, 8 – крыльчатка (вентилятор), 9 – обмотка якоря, 10 – вал, 11 – лапы, 12 – подшипник

дания основного магнитного потока, а также добавочных полюсов, служащих для достижения безыскровой работы щеток на коллекторе (улучшения коммутации).

К станине крепят болтами подшипниковые щиты, главные и дополнительные полюсы, она является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготовляют из стали – материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы 11 для крепления машины, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов 4.

Главные (основные) полюсы предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения. Главный полюс состоит из сердечника 4 и полюсной катушки 5. Сердечник полюса набирают из листов электротехнической стали толщиной 0,5–1 мм и стягивают шпильками. На сердечник насаживают катушки обмоток возбуждения.

Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Его выполняют так, чтобы воздушный зазор увеличивался от центра полюса к его концам. Это делается для того, чтобы уменьшить искажение поля под действием реакции якоря и рассеяние главного поля в зоне коммутации. У компенсированных машин постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповывают пазы для размещения компенсационной обмотки.

Число главных полюсов всегда четное, причем северные и южные полюсы чередуются, что достигается соответствующим соединением катушек обмотки возбуждения полюсов. Катушки всех полюсов соединяют последовательно. Полюсы крепятся к станине болтами или шпильками.

Добавочный полюс состоит из сердечника, изготовляемого из стали, и обмотки, изготовляемой из медных шин прямоугольного сечения. Обмотки добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, а полюсы устанавливают между главными полюсами и крепят к станине болтами.

Воздушный зазор под добавочными полюсами значительно больше, чем под главными. Поперечное сечение добавочных полюсов расширяется в сторону корпуса. Это увеличивает поверхность прилегания добавочного полюса к корпусу, что дает большую

устойчивость и предупреждает насыщение от большого потока рассеяния добавочных полюсов.

Якорь машины постоянного тока состоит из сердечника якоря с обмоткой 3, коллектора 7, вентилятора 8 и вала 10 с шарикоподшипником или роликоподшипником.

Сердечник якоря (рис. 2.4) машины представляет собой пакет из листов электротехнической стали 3 толщиной 0,5 мм, которые для уменьшения потерь от вихревых токов изолируют друг от друга лаком. Пакет запрессован на валу 1 якоря и удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами. Для лучшего охлаждения машины в сердечниках якоря утраивают вентиляционные каналы. Каждый лист пакета имеет зубцы, пазы и вентиляционные отверстия. В пазы сердечника укладывают проводники обмотки якоря 2, которые удерживаются с помощью клиньев 4. Обмотку якоря присоединяют к пластинам коллектора 5.

Обмотку выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводом обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части 9 обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом.

Коллектор (рис. 2.5) состоит из корпуса 1, болтов, нажимного кольца 4 и коллекторных пластин 2 трапецеидального сечения из твердотянутой меди, изолированных друг от друга и от вала якоря миканитовыми прокладками 3 и манжетами. Для удобства монтажа и обеспечения прочности крепления, нижнюю часть 5 коллек-

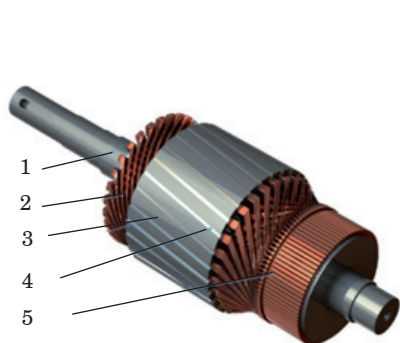


Рис. 2.4. Сердечник якоря

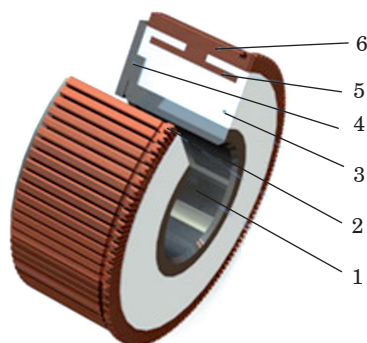


Рис. 2.5. Устройство коллектора

торных пластин 6 выполняют в форме «ласточкина хвоста» или Т-образного хвоста. Соединяют коллекторные пластины с проводами обмотки якоря с помощью «петушков», которые имеют прорези для укладки и запайки в них концов секций обмотки якоря.

Назначение коллектора в генераторе – механическое выпрямление переменных синусоидальных ЭДС в постоянное по величине и направлению напряжение, снимаемое во внешнюю цепь с помощью щеток, примыкающих к коллектору. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электро-механического преобразования энергии.

Для создания электрического контакта с поверхностью коллектора в машине устанавливают щетки, которые прикрепляют к щеткодержателю. Щеткодержатель (рис. 2.6) состоит из нажимных пластин 1; пружины 2, передающей давление на щетку 3 и обоймы 4.

Для присоединения элементов электрической цепи машины к щетке последняя снабжается гибким медным тросиком. Все щеткодержатели одной полярности соединяют между собой сборными шинами, присоединенными к выводам машины. Щеткодержатели крепят на траверсе.

Помимо указанных частей машина постоянного тока имеет два подшипниковых щита 7 (см. на рис. 2.3): передний (со стороны кол-

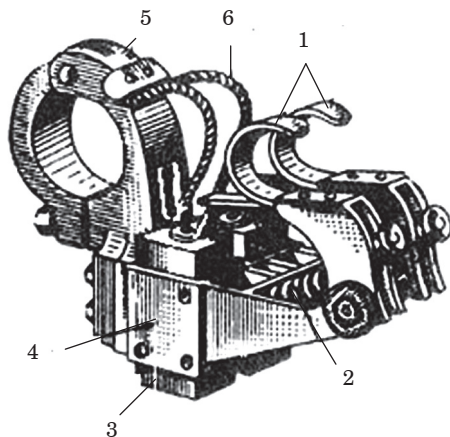


Рис. 2.6. Щеткодержатель

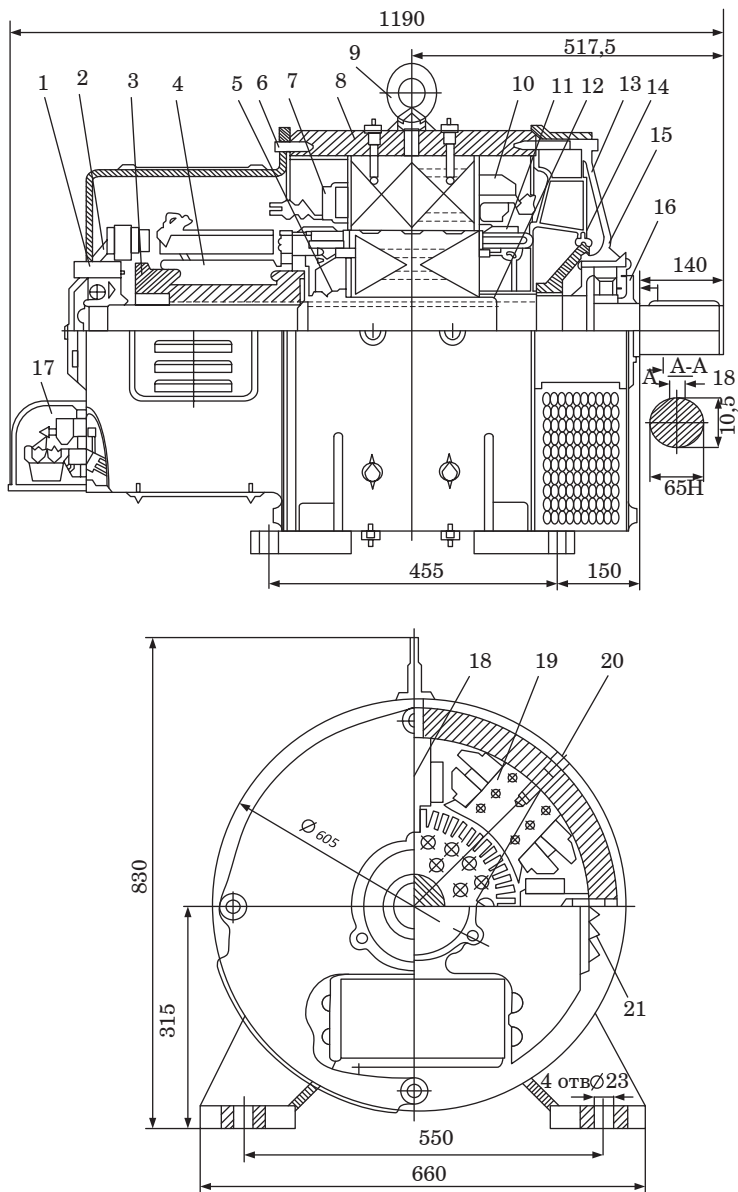


Рис. 2.7. Общий вид ДПТ с $h = 315$ мм, степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01

лктора) и задний. В центральной части щита имеется расточка под подшипник. На переднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки, не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов. Вентилятор 8 (см. рис. 2.3) служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

На общем виде ДПТ с $h = 315$ мм, степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01 (рис. 2.7) обозначены: 1 – подшипниковый щит; 2 – траверса; 3 – фланец коллектора; 4 – коллектор; 5 – уравнительные соединения обмотки якоря; 6 – обмоткодержатель; 7 – обмотка добавочных полюсов; 8 – станина; 9 – подъемное кольцо (рым-болт); 10 – обмотка главных полюсов; 11 – бандаж лобовой части обмотки якоря; 12 – обмотка якоря; 13 – подшипниковый щит; 14 – вентилятор; 15 – крышка подшипниковая внутренняя; 16 – крышка подшипниковая наружная; 17 – вводное устройство; 18 – сердечник добавочного полюса; 19 – сердечник главного полюса; 20 – сердечник якоря; 21 – жалюзи.

Из рассмотрения принципа действия и устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что неизменным элементом этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный узел – механический преобразователь рода тока. Таким образом, коллекторные машины сложнее бесколлекторных машин переменного тока (асинхронной и синхронной) и, следовательно, уступают им (особенно асинхронной машине) в надежности и имеют более высокую стоимость. Также к недостаткам можно отнести невозможность работы в агрессивных средах, необходимость частых ревизий, меньший срок службы и наличие радиопомех.

Преимуществами данной конструкции являются: для генераторов – жесткая внешняя характеристика, хорошие регулировочные свойства, для двигателей – лучшие механические характеристики, лучшие регулировочные свойства, высокая перегрузочная способность.

2.3. Магнитное поле машины постоянного тока

Магнитная система машины постоянного тока состоит из станины (ярма), сердечников главных полюсов с полюсными наконечниками, воздушного зазора и сердечника якоря.

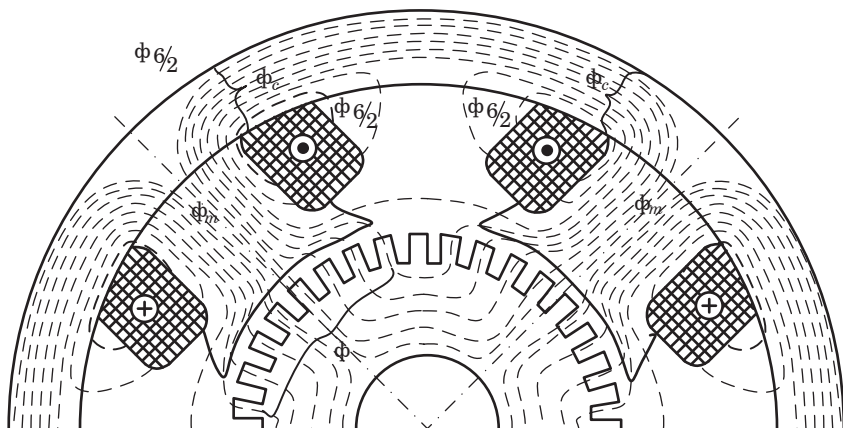


Рис. 2.8. Магнитное поле машины постоянного тока в режиме холостого хода

На рис. 2.8 показана картина магнитного поля четырехполюсной машины. При этом имеется в виду машина, работающая в режиме х.х., когда МДС создается лишь обмоткой возбуждения, а в обмотке якоря и обмотке добавочных полюсов тока нет или он настолько мал, что его влиянием на картину магнитного поля можно пренебречь. Магнитный поток главных полюсов состоит из двух неравных частей: большая часть образует основной магнитный поток Φ , а меньшая – магнитный поток рассеяния полюсов Φ_{σ} . Поток рассеяния учитывается коэффициентом рассеяния σ_m .

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме х.х. определяется суммой магнитных напряжений на участках магнитной цепи (воздушного зазора, зубцового слоя якоря, главного полюса, спинки якоря, станины (ярма)):

$$F_{в0} = \sum F = 2F_{\delta} + 2F_Z + 2F_m + F_a + F_{я}.$$

При работе машины в режиме х.х. ток в обмотке якоря практически отсутствует, а поэтому в машине действует лишь МДС обмотки возбуждения $F_{в0}$. Магнитное поле машины в этом случае симметрично относительно оси полюсов (рис. 2.9, а). График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представляет собой кривую, близкую к трапеции.

Если же машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток, который создаст в магнитной системе машины МДС якоря F_a . Допустим, что МДС возбуждения равна нулю и в машине действу-

ет лишь МДС якоря. Тогда магнитное поле, созданное этой МДС, будет иметь вид, представленный на рис. 2.9, б. Из этого рисунка видно, что МДС обмотки якоря направлена по линии щеток (в данном случае по геометрической нейтрали). Несмотря на то, что якорь вращается, пространственное положение МДС обмотки якоря остается неизменным, так как направление этой МДС определяется положением щеток.

Геометрическая нейтраль – это линия, проходящая через середину межполюсного пространства и середину машины.

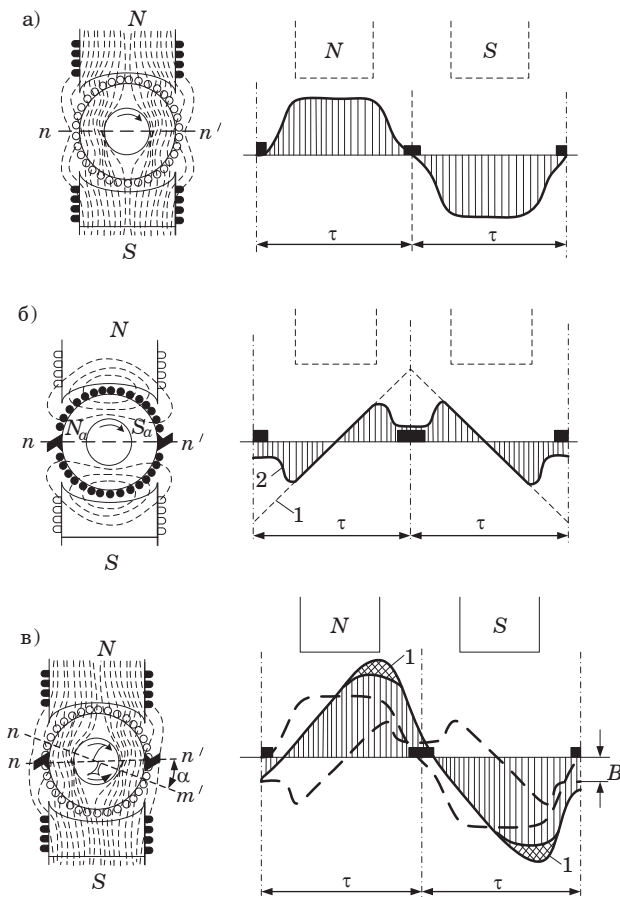


Рис. 2.9. Магнитное поле машины и распределение магнитной индукции в воздушном зазоре

Физическая нейтраль – это линия, проходящая через точки окружности якоря, где магнитная индукция равна нулю.

Наибольшее значение МДС якоря – на линии щеток (рис. 2.9, б, кривая 1), а по оси полюсов эта МДС равна нулю. Однако распределение магнитной индукции в зазоре от потока якоря совпадает с графиком МДС лишь в пределах полюсных наконечников. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко ослабляется (рис. 2.9, б, кривая 2). Объясняется это увеличением магнитного сопротивления потока якоря в межполюсном пространстве.

Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют **реакцией якоря**. Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов.

На рис. 2.9, в, показано распределение магнитных силовых линий результирующего поля машины, работающей в генераторном режиме при вращении якоря по часовой стрелке. Такое же распределение магнитных линий соответствует работе машины в режиме двигателя, но при вращении якоря против часовой стрелки. Если принять, что магнитная система машины не насыщена, то реакция якоря будет лишь искажать результирующий магнитный поток, не изменяя его значения: край полюса и находящийся под ним зубцовый слой якоря, где МДС якоря совпадает по направлению с МДС возбуждения, подмагничиваются; другой край полюса и зубцовый слой якоря, где МДС направлена против МДС возбуждения, размагничиваются. При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а физическая нейтраль mm' (линия, проходящая через точки на якоре, в которых индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали nn' на угол α . Чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажение результирующего поля, а, следовательно, тем больше угол смещения физической нейтрали. При работе машины в режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а при работе двигателем – против вращения якоря.

Искажение результирующего поля машины неблагоприятно отражается на ее рабочих свойствах. Во-первых, сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы щеточного контакта и может послужить причиной усиления искрения на коллекторе. Во-вторых, искажение результирующего поля машины влечет за собой перераспределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины.

На рис. 2.9, в, показан график распределения результирующего поля в зазоре, полученный совмещением кривых, изображенных на рис. 2.9, а, б. Из этого графика следует, что магнитная индукция в зазоре машины распределяется несимметрично относительно оси полюсов, резко увеличиваясь под подмагниченными краями полюсов. Это приводит к тому, что мгновенные значения ЭДС секций обмотки якоря в моменты попадания их пазовых сторон в зоны максимальных значений магнитной индукции (под подмагниченные края полюсных наконечников) резко повышаются. В результате возрастает напряжение между смежными коллекторными пластинами $U_{\text{к}}$. При значительных нагрузках машины напряжение $U_{\text{к}}$ можем превзойти допустимые пределы и механическая прокладка между смежными пластинами будет перекрыта электрической дугой. Имеющиеся на коллекторе частицы графита будут способствовать развитию электрической дуги, что приведет к возникновению мощной электрической дуги, перекрывающей весь коллектор или значительную его часть, – явления чрезвычайно опасного.

Способы устранения вредного влияния реакции якоря:

- Компенсационная обмотка, размещенная в полюсных наконечниках (соединяется последовательно с ОЯ);
- Увеличение воздушного зазора;
- Настройка коммутации (под нагрузкой перемещая щетки добиваются совпадения ГН и ФН);
- Установка добавочных полюсов на ГН (их обмотки соединяются с ОЯ так, чтобы магнитное поле полюсов компенсировало поле якоря).

2.4. Учет размагничивающего влияния реакции якоря

Размагничивающее влияние реакции якоря при нагрузке машины постоянного тока учитывают при расчете числа витков полюсных катушек возбуждения. С этой целью при расчете числа витков такой катушки, используют значение МДС обмотки возбуждения, соответствующее номинальной нагрузке машины:

$$w_{\text{к.в}} = \frac{F_{\text{в.н}}}{2 \cdot I_{\text{в}}},$$

где $I_{\text{в}}$ – ток в обмотке возбуждения, А.

Значение МДС обмотки возбуждения на пару полюсов $F_{\text{в.н}}$ должно быть таким, чтобы ЭДС якоря E_a при работе машины с номи-

нальной нагрузкой была такой же, что и в режиме холостого хода, когда МДС возбуждения $F_{в0} = \sum F_{ном}$.

В современных машинах постоянного тока щетки устанавливаются на геометрической нейтрали. В этом случае МДС обмотки возбуждения при нагрузке машины:

$$F_{в.н} = F_{в0} + F_{qd}.$$

Здесь F_{qd} представляет собой приращение МДС обмотки возбуждения, компенсирующее размагничивающее влияние реакции якоря по поперечной оси на пару полюсов.

Количественный учет размагничивающего действия реакции якоря усложнен тем, что МДС поперечной реакции якоря действует перпендикулярно оси главных полюсов и вызывает искажение магнитного потока обмотки возбуждения. Возникающее при этом размагничивание машины происходит из-за магнитного насыщения элементов магнитной цепи машины, в первую очередь зубцов сердечника якоря.

Размагничивающее действие реакции якоря по поперечной оси учитывают введением коэффициента реакции якоря $k_{р.я}$. Этот коэффициент получен в результате исследования большого количества некомпенсированных машин постоянного тока при различных значениях магнитной индукции в зубцах якоря B_z .

Приращение МДС, компенсирующее реакцию якоря по поперечной оси,

$$F_{qd} = k_{р.я} \cdot F_a$$

где F_a – МДС обмотки якоря на пару полюсов, А.

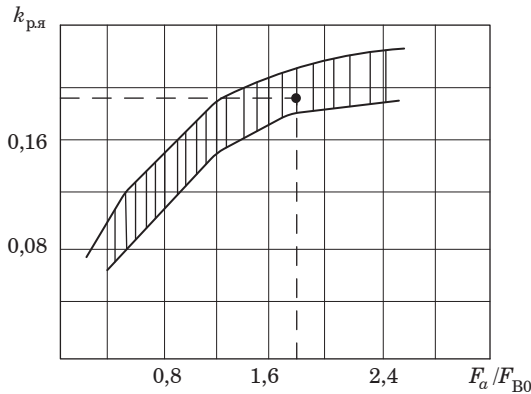


Рис. 2.10. График $k_{р.я} = f(F_a / F_{в0})$

Для большинства машин постоянного тока магнитная индукция в зубцах якоря $B_z = 1.7-2.3$ Тл. Приращение МДС F_{qd} определяют по графику $k_{p.я} = f(F_a / F_{B0})$ (рис. 2.10), где нижняя граница графика соответствует $B_z = 1,7$ Тл, а верхняя – $B_z = 2,3$ Тл.

Значение тока в обмотке возбуждения принимают в зависимости от вида возбуждения машины постоянного тока: при параллельном возбуждении при мощности машин от 10 до 1000 кВт ток I_B принимают соответственно от 4 до 1% от номинального тока машины, а в машинах мощностью от 1 до 10 кВт – соответственно от 8 до 4%; в машинах последовательного возбуждения ток возбуждения принимают равным току якоря.

В машинах постоянного тока с компенсационной обмоткой $F_{qd}=0$, т. е. расчет числа витков полюсной катушки ведут по величине $F_{B0} = \sum F_{ном}$.

2.5. Способы возбуждения машин постоянного тока

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля. В большинстве машин постоянного тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Свойства машин постоянного тока в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, т. е. *способом возбуждения*.

По способам возбуждения машины постоянного тока можно классифицировать следующим образом:

– *машины независимого возбуждения*, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (рис. 2.11, а);

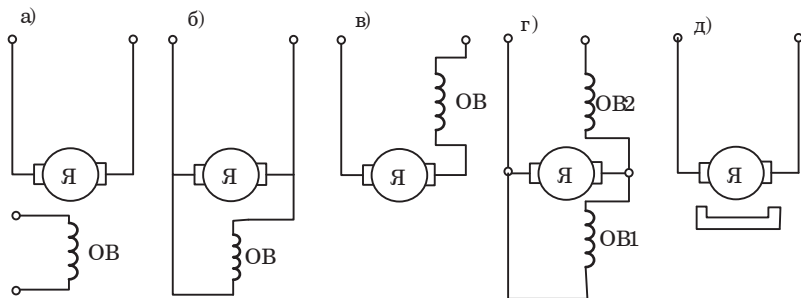


Рис. 2.11. Способы возбуждения машин постоянного тока

- машины параллельного возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 2.11, б);
- машины последовательного возбуждения (обычно применяемые в качестве двигателей), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 2.11, в);
- машины смешанного возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения – параллельная ОВ1 и последовательная ОВ2 (рис. 2.11, г);
- машины с возбуждением постоянными магнитами (рис. 2.11, д).

Все указанные машины (кроме последних) относятся к машинам с *электромагнитным возбуждением*, так как магнитное поле в них создается электрическим током, проходящим в обмотке возбуждения.

Начала и концы машин постоянного тока, согласно ГОСТу, обозначаются: обмотка якоря – Я1 и Я2, обмотка добавочных полюсов – Д1 и Д2, компенсационная обмотка – К1 и К2, обмотка возбуждения независимая – М1 и М2, обмотка возбуждения параллельная (шунтовая) – Ш1 и Ш2, обмотка возбуждения последовательная (сериесная) – С1 и С2.

2.6. Торможение электродвигателей постоянного тока

Для остановки электродвигателей постоянного тока существует три вида торможения:

1. Динамическое торможение.

При динамическом торможении электродвигателя постоянного тока производится замыкание обмотки якоря электромотора, которая возможна не только накоротко, но и чрез специальный резистор. При таком способе электродвигатель начинает работать в качестве генератора, а преобразуется в электрическую, которая расходуется на нагрев тормозного резистора и других элементов цепи якоря.

Тормозной ток якоря при торможении:

$$I_{я.н} = \frac{U_{я} - E_{я}}{R} = \frac{0 - E_{я}}{R} = -\frac{E_{я}}{R}.$$

2. Рекуперативное торможение.

Данный вид торможения применяется в том случае, если включенный электродвигатель вращается со скоростью, значительно превышающей допустимую скорость холостого хода. Во время ре-

продуктивного торможения электродвигатель также начинает работу в качестве генератора и отдает электрическую энергию в сеть.

Тормозной момент одновременно возникает на валу. Режим применяется в приводах грузоподъемных механизмов, когда происходит опускание груза. Также допустимо применять рекуперативное торможение электродвигателя во время регулирования скорости вращения. Отличает такой способ высокая степень экономичности, так как электроэнергия возвращается в сеть.

3. Торможение электродвигателя способом противовключения.

Производится переключением выводов якорной обмотки либо обмотки возбуждения, вследствие чего изменяются направление тока в якоре либо магнитного потока и знак момента, который из вращающего превращается тормозной. Ток якоря после переключения его обмотки становится равным

$$I_{\text{я.н}} = \frac{U_{\text{я}} - E_{\text{я}}}{R} = \frac{-U_{\text{яТ}} - E_{\text{я}}}{R} = -\frac{U_{\text{яТ}} + E_{\text{я}}}{R}.$$

2.7. Основные законы машин постоянного тока

Коллекторные машины обладают свойством обратимости, т. е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому если машину постоянного тока подключить к источнику энергии постоянного тока, то в обмотке возбуждения и в обмотке якоря машины появятся токи. Взаимодействие тока якоря с полем возбуждения создает на якоре электромагнитный момент M , который является не тормозящим, как это имело место в генераторе, а *вращающим*.

Под действием электромагнитного момента якоря машина начнет вращаться, т. е. машина будет работать в режиме двигателя, потребляя из сети электрическую энергию и преобразуя ее в механическую. В процессе работы двигателя его якорь вращается в магнитном поле. В обмотке якоря индуцируется ЭДС E_a , направление которой можно определить по правилу «правой руки». По своей природе она не отличается от ЭДС, наводимой в обмотке якоря генератора. В двигателе же ЭДС направлена против тока I_a , и поэтому ее называют *противоэлектродвижущей* силой (противо-ЭДС) якоря.

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения,

$$U = E_a + I_a \sum r.$$

Известно, что подведенное к двигателю напряжение уравновешивается противо-ЭДС обмотки якоря и падением напряжения в цепи якоря. На основании этого ток якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r}.$$

Уравнение мощности для цепи якоря:

$$UI_a = I_a^2 \sum r + E_a I_a,$$

где UI_a – мощность в цепи обмотки якоря; $I_a^2 \sum r$ – мощность электрических потерь в цепи якоря.

Для выяснения сущности выражения $E_a I_a$ сделаем следующее преобразование:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a \text{ или } E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega,$$

где $\frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = M$.

Тогда

$$E_a I_a = M\omega = P_{эм},$$

где $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ – угловая частота вращения якоря; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность двигателя.

Следовательно, выражение $E_a I_a$ представляет собой *электромагнитную мощность двигателя*.

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum r.$$

Анализ этого уравнения показывает, что с увеличением нагрузки на вал двигателя, т. е. с увеличением электромагнитного момента M , возрастает мощность в цепи обмотки якоря, т. е. мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным, то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря.

В зависимости от способа возбуждения двигателя постоянного тока, так же, как и генераторы, разделяют на двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрические) и с электромагнитным возбуждением. Последние в соответствии со схемой включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря подразделяют на двигатели параллельного (шунтовые), последовательного (серийные) и смешанного (компаундные) возбуждения.

В соответствии с формулой ЭДС $E_a = c_B \Phi n$ частота вращения двигателя (об/мин):

$$n = \frac{E_a}{c_B \Phi}.$$

Подставив значение E_a , получим (об/мин):

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_B \Phi}.$$

Частота вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения. Физически это объясняется тем, что повышение напряжения U или уменьшение потока Φ вызывает увеличение разности $(U - E_a)$; это, в свою очередь, ведет к росту тока I_a . Вследствие этого возросший ток повышает вращающий момент, и если при этом нагрузочный момент остается неизменным, то частота вращения двигателя увеличивается.

Регулировать частоту вращения двигателя можно изменением либо напряжения U , подводимого к двигателю, либо основного магнитного потока Φ , либо электрического сопротивления в цепи якоря $\sum r$.

Направление вращения якоря зависит от направлений магнитного потока возбуждения Φ и тока в обмотке якоря. Поэтому, изменив направление какой-либо из указанных величин, можно изменить направление вращения якоря. Следует иметь в виду, что переключение общих зажимов схемы у рубильника не дает изменения направления вращения якоря, так как при этом одновременно изменяется направление тока и в обмотке якоря, и в обмотке возбуждения.

Пусковой ток якоря при полном сопротивлении пускового реостата:

$$I_m = \frac{U - E_a}{\sum r + r_n}.$$

С появлением тока в цепи якоря $I_{n\max}$ возникает пусковой момент $M_{n\max}$, под действием которого начинается вращение якоря. По мере нарастания частоты вращения увеличивается противо-ЭДС $E_a = c_e \Phi n_n$, что ведет к уменьшению пускового тока и пускового момента.

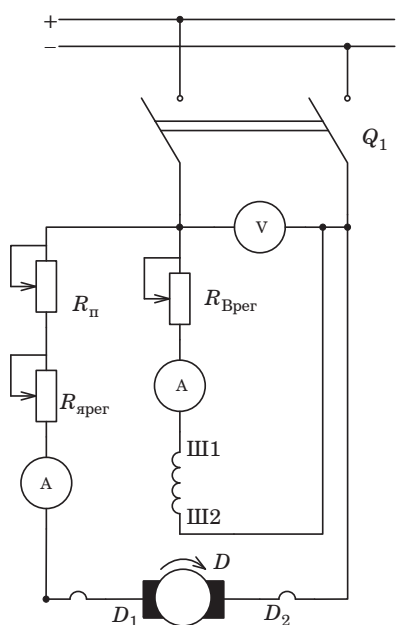


Рис. 2.12. Схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Схема включения в сеть двигателя показана на рис. 2.12. Характерной особенностью *параллельного возбуждения* является то, что ток в обмотке возбуждения не зависит от тока нагрузки (тока якоря). Реостат в цепи возбуждения $r_{\text{пр}}$ служит для регулирования тока в обмотке возбуждения и магнитного потока главных полюсов.

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его *рабочими характеристиками*, под которыми понимают зависимость частоты вращения n , тока I , полезного момента M_2 , вращающего момента M от мощности на валу двигателя P_2 при $U = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = \text{const}$.

При включении *стабилизирующей* обмотки согласованно с параллельной обмоткой возбуждения ее МДС компенсирует размагничивающее действие реакции якоря так, что поток Φ во всем диапазоне

нагрузок остается практически неизменным.

Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к х.х., выраженное в процентах, называют *номинальным изменением частоты вращения*:

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100\%,$$

где n_0 – частота вращения двигателя в режиме х.х.

Обычно для двигателей параллельного возбуждения $\Delta n_{\text{ном}} = 2 \div 8\%$, поэтому характеристику частоты вращения двигателя параллельного возбуждения называют *жесткой*.

2.8. Введение дополнительного сопротивления в цепь якоря

Дополнительное сопротивление (реостат $r_{\text{д}}$) включают в цепь якоря аналогично пусковому реостату (ПР). Однако в отличие от

последнего оно должно быть рассчитано на продолжительное протекание тока.

При включении сопротивления r_d в цепь якоря выражение частоты принимает вид

$$n = \frac{U - I_a (\sum r + r_d)}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n,$$

где $n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}$ – частота вращения в режиме х.х.; $\Delta n = \frac{I_a (\sum r + r_d)}{c_e \Phi}$ – изменение частоты вращения, вызванное падением напряжения в цепи якоря.

Частоту вращения двигателей последовательного возбуждения можно регулировать изменением либо напряжения, либо магнитного потока обмотки возбуждения. В первом случае в цепь якоря последовательно включают регулировочный реостат r_{pr} . С увеличением сопротивления этого реостата уменьшаются напряжение на входе двигателя и частота его вращения. Этот метод регулирования применяют главным образом в двигателях небольшой мощности. В случае значительной мощности двигателя этот способ неэкономичен из-за больших потерь энергии в r_{pr} . Кроме того, реостат r_{pr} , рассчитываемый на рабочий ток двигателя, получается громоздким и дорогостоящим.

Регулировать частоту вращения двигателя изменением магнитного потока можно тремя способами: шунтированием обмотки возбуждения реостатом r_{pr} , секционированием обмотки возбуждения и шунтированием обмотки якоря реостатом $r_{ш}$. Включение реостата r_{pr} , шунтирующего обмотку возбуждения, а также уменьшение сопротивления этого реостата ведет к снижению тока возбуждения $I_B = I_a - I_{pr}$, а следовательно, к росту частоты вращения. Этот способ экономичнее предыдущего, применяется чаще и оценивается коэффициентом регулирования $k_{pr} = (I_{pr} / I_a) \cdot 100\%$. Обычно сопротивление реостата r_{pr} принимается таким, чтобы $k_{pr} \geq 50\%$.

При секционировании обмотки возбуждения отключение части витков обмотки сопровождается ростом частоты вращения. При шунтировании обмотки якоря реостатом увеличивается ток возбуждения $I_B = I_a + I_m$, что вызывает уменьшение частоты вращения. Этот способ регулирования, хотя и обеспечивает глубокую регулировку, неэкономичен и применяется очень редко.

2.9. Потери в машинах постоянного тока

В машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, имеют место магнитные, электрические и механические потери (составляющие группу основных потерь) и добавочные потери.

Магнитные потери P_M происходят только в сердечнике якоря, так как только этот элемент магнитопровода машины постоянно подвергается перемагничиванию. Величина магнитных потерь, состоящих из потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов, зависит от частоты перемагничивания $f=pn/60$, значений магнитной индукции в зубцах и спинке якоря, толщины листов электротехнической стали, ее магнитных свойств и качества изоляции этих листов в пакете якоря.

Электрические потери в коллекторной машине постоянного тока обусловлены нагревом обмоток и щеточного контакта. Потери в цепи возбуждения определяются потерями в обмотке возбуждения и в реостате, включенном в цепь возбуждения:

$$P_{э.в} = U_s I_B.$$

Здесь U_B – напряжение на зажимах цепи возбуждения.

Потери в обмотках цепи якоря:

$$P_{э.а} = I_a^2 \sum r$$

где сопротивление обмоток в цепи якоря $\sum r$, приведенное к расчетной рабочей температуре $\theta_{раб}$.

Электрические потери также имеют место и в контакте щеток:

$$P_{э.щ} = \Delta U_{щ} I_a,$$

где $\Delta U_{щ}$ – переходное падение напряжения, В, на щетках обеих полярностей, принимаемое в соответствии с маркой щеток.

Электрические потери в цепи якоря и в щеточном контакте зависят от нагрузки машины, поэтому эти потери называют *переменными*.

Механические потери. В машине постоянного тока механические потери складываются из потерь от трения щеток о коллектор $P_k = k_{тр} S_{щ} f_{щ} V_k$ трения в подшипниках $P_{п}$ и на вентиляцию $P_{вен}$

$$P = P_k + P_{п} + P_{вен},$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения щеток о коллектор ($k_{тр} = 0,2 \div 0,3$), $S_{щ}$ – поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором, м²;

$f_{\text{щ}}$ – удельное давление, Н/м², щетки (для машин общего назначения $f_{\text{щ}} = (2 \div 3) \cdot 10^4$ Н/м²); окружная скорость коллектора (м/с) диаметром D_k (м)

$$V_k = \frac{\pi D_k n}{60}.$$

Механические и магнитные потери при стабильной частоте вращения ($n = \text{const}$) можно считать *постоянными*.

Сумма магнитных и механических потерь составляют потери х.х.:

$$P_0 = P_M + P_{\text{мех}}.$$

Если машина работает в качестве двигателя параллельного возбуждения в режиме х.х., то она потребляет из сети мощность:

$$P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_M + P_{\text{мех}} + I_{a0}^2 \sum r + \Delta U_{\text{щ}} I_{a0} + U_B I_B.$$

Однако ввиду небольшого значения тока I_{a0} электрические потери $I^2 \sum r$ и $\Delta U_{\text{щ}} I_{a0}$ весьма малы и обычно не превышают 3% потерь $P_0 = P_M + P_{\text{мех}}$. Поэтому, не допуская заметной ошибки, можно записать:

$$P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_0 + U_B I_B,$$

откуда потери х.х.

$$P_0 = P_{10} - U_B I_B.$$

Таким образом, потери х.х. (магнитные и механические) могут быть определены экспериментально.

В машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь – *добавочных*. Эти потери складываются из потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в уравнивательных соединениях, в стали якоря из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке, в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией основного потока из-за наличия зубцов якоря, и др. Добавочные потери составляют хотя и небольшую, но не поддающуюся точному учету величину.

Поэтому, согласно ГОСТу, в машинах без компенсационной обмотки значение добавочных потерь P_d принимают равным 1% от полезной мощности для генераторов или 1% от подводимой мощности для двигателей. В машинах с компенсационной обмоткой значение добавочных потерь принимают равным соответственно 0,5%.

Мощность (Вт) на входе машины постоянного тока (подводимая мощность) для генератора (механическая мощность):

$$P_{1\text{ген}} = M_1 \omega = 0,105 M_1 n,$$

где M_1 – вращающий момент приводного двигателя, Н·м;

Для двигателя (электрическая мощность):

$$P_{1\text{дв}} = UI.$$

Мощность (Вт) на выходе машины (полезная мощность):

– для генератора (электрическая мощность):

$$P_{2\text{ген}} = UI;$$

– для двигателя (механическая мощность):

$$P_{2\text{дв}} = 0,105 M_2 n,$$

где M_1 и M_2 – момент на валу электрической машины, Н·м; n – частота вращения, об/мин.

2.10. Коэффициент полезного действия.

Коэффициент полезного действия электрической машины представляет собой отношение мощностей отдаваемой (полезной) P_2 к подводимой (потребляемой) P_1 :

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

Определив суммарную мощность вышеперечисленных потерь

$$\sum P = P_M + P_{\text{мех}} + P_{\text{э.в}} + P_{\text{э.а}} + P_{\text{э.щ}} + P_{\text{д}},$$

можно подсчитать КПД машины по одной из следующих формул:
для генератора

$$\eta_{\text{ген}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{UI + \sum P};$$

для двигателя

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{UI}.$$

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,75÷0,90 для машин мощностью от 1 до 100 кВт и 0,90÷0,97 для машин мощностью свыше 100 кВт. Намного меньше КПД машин постоянного

тока малой мощности. Например, для машин мощностью от 5 до 50 Вт $\eta = 0,15 \div 0,50$. Указанные значения КПД соответствуют номинальной нагрузке машины. Зависимость КПД машины постоянного тока от нагрузки выражается графиком $\eta = f(P_2)$ форма которого характерна для электрических машин.

Коэффициент полезного действия электрической машины можно определять: методом непосредственной нагрузки по результатам измерений подведенной P_1 и отдаваемой P_2 мощностей; косвенным методом по результатам измерений потерь.

Метод непосредственной нагрузки применим только для машин малой мощности, для остальных случаев применяется косвенный метод, как более точный и удобный. Установлено, что при $\eta > 80\%$ измерять КПД методом непосредственной нагрузки нецелесообразно, так как он дает большую ошибку, чем косвенный метод.

Существует несколько косвенных способов определения КПД. Наиболее прост способ холостого хода двигателя, когда потребляемая машиной постоянного тока мощность затрачивается только на потери х.х. Что же касается электрических потерь, то их определяют расчетным путем после предварительного измерения электрических сопротивлений обмоток и приведения их к рабочей температуре.

Вопросы по теоретическому материалу

1. В чем заключается закон электромагнитной индукции?
2. Перечислите основные элементы конструкции машины постоянного тока и опишите их назначение.
3. Какого назначения коллектора в генераторе и двигателе?
4. Перечислите составные части якоря.
5. Для чего нужна компенсационная обмотка?
6. Дайте определение реакции якоря машины постоянного тока. Поясните причину возникновения поперечной реакции якоря и ее воздействие на работу машины.
7. Что такое физическая и геометрическая нейтраль? Почему щетки устанавливаются на физической нейтрали?
8. Какую роль выполняет обмотка возбуждения?
9. В каких случаях и для чего применяются добавочные магнитные полюса?
10. Какие существуют способы возбуждения машин постоянного тока?
11. Какие методы существуют для торможения двигателя постоянного тока?

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ К 2 РАЗДЕЛУ

Практическая работа № 7.

Учет размагничивающего влияния реакции якоря

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения мощностью $P_{\text{ном}}$ работает от сети напряжением U_c . КПД двигателя при номинальной нагрузке $\eta_{\text{ном}}$. Двигатель четырехполюсный, обмотка якоря простая волновая ($2a = 2$), число эффективных проводников в обмотке N , ток возбуждения составляет $i_{\text{вн}}\%$ от номинального потребляемого двигателем тока.

Определить число витков в полюсной катушке возбуждения $w_{\text{к.в}}$, если все они соединены последовательно, воздушный зазор $\delta = 2,0$ мм, коэффициент воздушного зазора $k_\delta = 1,3$, магнитная индукция в зазоре $B_\delta = 0,76$ Тл, в зубцах якоря $B_z = 1,8$ Тл, а коэффициент насыщения магнитной цепи машины $k_\mu = 1,35$. Числовые значения заданных величин исходных данных для каждого из вариантов указаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные

Номер варианта	$P_{\text{ном}}$, кВт	U_c , В	$\eta_{\text{ном}}$, %	N	δ , мм	B_z , Тл	B_δ , Тл
1	100	440	89	280	2,0	2,2	0,82
2	120	440	90	300	2,0	2,3	0,85
3	85	220	87	150	1,8	1,8	0,80
4	30	220	85	120	1,8	1,9	0,83
5	45	440	85	260	1,6	1,7	0,80
6	90	440	89	240	1,8	1,9	0,83
7	75	220	86	120	1,6	2,0	0,82
8	100	440	89	280	2,0	2,2	0,82
9	120	440	90	300	2,0	2,3	0,85
10	85	220	87	150	1,8	1,8	0,80
11	30	220	85	120	1,8	1,9	0,83
12	45	440	85	260	1,6	1,7	0,80
13	90	440	89	240	1,8	1,9	0,83
14	75	220	86	120	1,6	2,0	0,82
15	100	440	89	280	2,0	2,2	0,82
16	120	440	90	300	2,0	2,3	0,85
17	85	220	87	150	1,8	1,8	0,80

Номер варианта	$P_{\text{ном}}$, кВт	U_c , В	$\eta_{\text{ном}}$, %	N	δ , мм	B_z , Тл	B_δ , Тл
18	30	220	85	120	1,8	1,9	0,83
19	45	440	85	260	1,6	1,7	0,80
20	90	440	89	240	1,8	1,9	0,83
21	75	220	86	120	1,6	2,0	0,82
22	100	440	89	280	2,0	2,2	0,82
23	120	440	90	300	2,0	2,3	0,85
24	85	220	87	150	1,8	1,8	0,80
25	30	220	85	120	1,8	1,9	0,83
26	45	440	85	260	1,6	1,7	0,80
27	90	440	89	240	1,8	1,9	0,83
28	75	220	86	120	1,6	2,0	0,82
29	100	440	89	280	2,0	2,2	0,82
30	120	440	90	300	2,0	2,3	0,85

Пример

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения мощностью $P_{\text{ном}} = 75$ кВт, работает от сети напряжением $U = 220$ В. КПД двигателя при номинальной нагрузке $\eta_{\text{ном}} = 0,89$. Двигатель четырехполюсный, обмотка якоря простая волновая ($2a=2$), число эффективных проводников в обмотке $N=164$, ток возбуждения составляет 1,3% от номинального потребляемого двигателем тока.

Решение:

Ток, потребляемый двигателем при номинальной нагрузке:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{U \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{75 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,89} = 383 \text{ А.}$$

Ток в обмотке возбуждения:

$$I_B = 0,013 \cdot I_{\text{ном}} = 0,013 \cdot 383 = 5 \text{ А.}$$

Ток в обмотке якоря:

$$I_a = I_{\text{ном}} - I_B = 383 - 5 = 378 \text{ А.}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_\delta = 0,8 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,76 \cdot 2,0 \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 1580 \text{ А.}$$

МДС возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

$$F_{B0} = 2 \cdot F_\delta \cdot k_\mu = 2 \cdot 1580 \cdot 1,35 = 4266 \text{ А.}$$

МДС обмотки якоря на пару полюсов по

$$F_a = \frac{N \cdot I_a}{4 \cdot a \cdot p} = \frac{164 \cdot 378}{4 \cdot 1 \cdot 2} = 7749 \text{ А.}$$

Коэффициент реакции якоря по рис. 2.10 при $\frac{F_a}{F_{B0}} = \frac{7749}{4266} = 1,8$ и $B_z = 1,8 \text{ Тл}$ равен $k_{p.я} = 0,19$.

Приращение МДС, компенсирующее реакцию якоря по поперечной оси:

$$F_{qd} = k_{p.я} \cdot F_a = 0,19 \cdot 7749 = 1472 \text{ А.}$$

МДС возбуждения при номинальной нагрузке двигателя:

$$F_{в.н} = F_{B0} + F_{qd} = 4266 + 1472 = 5738 \text{ А.}$$

Число витков в полюсной катушке возбуждения:

$$w_{к.в} = \frac{F_{в.н}}{2 \cdot I_B} = \frac{5738}{2 \cdot 5} = 574.$$

Практическая работа № 8. Определение параметров ДПТ параллельного возбуждения

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: номинальная мощность $P_{ном}$, напряжение питания $U_{ном}$, номинальная частота вращения $n_{ном}$, сопротивление обмоток в цепи якоря $\sum r$, сопротивление цепи возбуждения r_B , падение напряжения в щеточном контакте щеток $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 2.2.

Требуется определить потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки $I_{ном}$, сопротивление пускового реостата $R_{п.р}$, при котором начальный пусковой ток в цепи якоря двигателя был бы равен $2,5 \cdot I_{а ном}$, начальный пусковой момент $M_{п}$, частоту вращения n_0 и ток I_0 в режиме холостого хода, номинальное изменение частоты вращения якоря двигателя при сбросе нагрузки. Исходные данные из табл. 2.2. Влиянием реакции якоря пренебречь.

Пример.

1. Мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке:

Таблица 2.2

**Параметры двигателей постоянного тока
параллельного возбуждения**

Номер варианта	$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	$n_{\text{НОМ}}, \text{ об/мин}$	$\eta_{\text{НОМ}}, \%$	$\Sigma r, \text{ Ом}$	$r_{\text{В}}, \text{ Ом}$
1	25	440	1500	85	0,15	88
2	15	220	1000	83,8	0,12	73
3	45	440	1500	88	0,13	88
4	4,2	220	1500	78	0,15	64
5	18	220	1200	84	0,12	73
6	25	440	1500	85	0,15	88
7	15	220	1000	83,8	0,12	73
8	45	440	1500	88	0,13	88
9	4,2	220	1500	78	0,15	64
10	18	220	1200	84	0,12	73
11	25	440	1500	85	0,15	88
12	15	220	1000	83,8	0,12	73
13	45	440	1500	88	0,13	88
14	4,2	220	1500	78	0,15	64
15	18	220	1200	84	0,12	73
16	25	440	1500	85	0,15	88
17	15	220	1000	83,8	0,12	73
18	45	440	1500	88	0,13	88
19	4,2	220	1500	78	0,15	64
20	18	220	1200	84	0,12	73
21	25	440	1500	85	0,15	88
22	15	220	1000	83,8	0,12	73
23	45	440	1500	88	0,13	88
24	4,2	220	1500	78	0,15	64
25	18	220	1200	84	0,12	73
26	25	440	1500	85	0,15	88
27	15	220	1000	83,8	0,12	73
28	45	440	1500	88	0,13	88
29	4,2	220	1500	78	0,15	64
30	18	220	1200	84	0,12	73

$$P_{\text{1НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{25}{0,85} = 29,4 \text{ кВт.}$$

2. Ток, потребляемый двигателем при номинальной нагрузке:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{1\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{29,4 \cdot 10^3}{440} = 67 \text{ А.}$$

3. Ток в цепи обмотки возбуждения:

$$I_{\text{В}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{r_{\text{В}}} = \frac{440}{88} = 5 \text{ А.}$$

4. Ток в обмотке якоря:

$$I_{\text{аНОМ}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{В}} = 67 - 5 = 62 \text{ А.}$$

5. Начальный пусковой ток якоря при заданной кратности 2,5:

$$I_{\text{ап}} = 2,5 \cdot I_{\text{аНОМ}} = 2,5 \cdot 62 = 155 \text{ А.}$$

6 Требуемое сопротивление цепи якоря при заданной кратности пускового тока 2,5:

$$R_{\text{а}} = R_{\text{п.р}} + \Sigma r = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{ап}}} = \frac{440}{155} = 2,83 \text{ Ом.}$$

7. Сопротивление пускового реостата:

$$R_{\text{п.р}} = R_{\text{а}} - \Sigma r = 2,83 - 0,15 = 2,68 \text{ Ом.}$$

8. ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки:

$$E_{\text{а ном}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{а ном}} \cdot \Sigma r - U_{\text{щ}} = 440 - 62 \cdot 0,15 - 2 = 428,7 \text{ В.}$$

9. Из выражения $E_{\text{а}} = C_E \cdot \Phi \cdot n$ определим:

$$C_E \cdot \Phi = \frac{E_{\text{а}}}{n} = \frac{428,7}{1500} = 0,285;$$

отношение коэффициентов:

$$\frac{C_M}{C_E} = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} = 9,55;$$

$$\frac{C_E}{C_M} = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$$

следовательно, в данном случае:

$$C_M \cdot \Phi = 9,55 \cdot C_E \cdot \Phi = 9,55 \cdot 0,285 = 2,72.$$

10. Начальный пусковой момент при заданной кратности пускового тока 2,5:

$$M_{\text{п}} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{ап}} = 2,72 \cdot 155 = 422 \text{ Н} \cdot \text{М.}$$

11. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \cdot \frac{25000}{1500} = 159 \text{ Н} \cdot \text{М}.$$

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке:

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ЭМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \cdot \frac{26579}{1500} = 169 \text{ Н} \cdot \text{М}.$$

где электромагнитная мощность при номинальной нагрузке:

$$P_{\text{ЭМ.НОМ}} = E_{a\text{НОМ}} \cdot I_{a\text{НОМ}} = 428,7 \cdot 62 = 26579 \text{ Вт}.$$

13. Момент холостого хода:

$$M_0 = M_{\text{НОМ}} - M_{2\text{НОМ}} = 169 - 159 = 10 \text{ Н} \cdot \text{М}.$$

14. Ток якоря в режиме холостого хода:

$$I_{a0} = \frac{M_0}{C_M \cdot \Phi} = \frac{10}{2,72} = 3,68 \text{ А}.$$

15. ЭДС якоря в режиме холостого хода (принимая $\Delta U_{\text{щ}} = 0$):

$$E_{a0} = U_{\text{НОМ}} - I_{a0} \cdot \sum r = 440 - 3,68 \cdot 0,15 = 439 \text{ В}.$$

16. Частота вращения якоря в режиме холостого хода:

$$n_0 = \frac{E_{a0}}{C_E \cdot \Phi} = \frac{439}{0,285} = 1540 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

17. Номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки:

$$\Delta n_{\text{НОМ}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{1540 - 1500}{1500} \cdot 100\% = 2,66\%.$$

Практическая работа № 9.

Анализ работы двигателя постоянного тока

Электродвигатель постоянного тока отключен от сети и якорь его неподвижен. К обмотке якоря приложили постоянное напряжение 2 В, в результате чего установился постоянный ток 4 А. Затем электродвигатель пустили в ход и при напряжении 220 В, приложенном к зажимам обмотки вращающего якоря, ток в этой обмотке достиг 20 А. Исходные данные представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Параметры двигателей постоянного тока

Вариант	U	I	$U_{\text{сети}}$	$I_{\text{я}}$
1	1	0,1	220	15
2	3	0,2	380	20
3	5	0,3	220	20
4	7	0,4	380	15
5	9	0,5	220	15
6	11	0,6	115	20
7	12	0,7	380	15
8	14	0,8	220	20
9	15	0,9	115	15
10	16	1,0	220	20
11	18	1,1	380	15
12	27	1,2	380	15
13	30	1,3	115	20
14	32	1,4	220	20
15	34	1,5	220	15
16	36	1,6	115	15
17	38	1,7	380	20
18	40	1,8	115	20
19	42	1,9	220	20
20	44	2,0	115	20

Определить:

- 1) сопротивление цепи якоря;
- 2) встречную э. д. с. электродвигателя;
- 3) мощность на входе в электродвигатель и механическую мощность;
- 4) ток в обмотке якоря:
 - а) если уменьшить скорость вращения якоря на 20% при том же напряжении 220 В и прежних условиях в цепи возбуждения;
 - б) если, не отключая электродвигатель, затормозить вращение вала;
 - в) если произвести пуск электродвигателя, не вводя пускового реостата.

Практическая работа № 10.
Расчет параметров двигателя постоянного тока
с параллельным возбуждением

Используя приведенные в табл. 2.4 значения параметров двигателей постоянного тока с параллельным (шунтовым) возбуждением, нарисовать электрическую схему подключения обмотки двигателя и определить для каждого варианта значения параметров, величины которых не указаны в этой таблице.

Номинальное значение частоты сети переменного тока $f_c = 50$ Гц.

Таблица 2.4

Исходные данные для задачи 10

№	P_H	U_H	η_H	ΣP_H	P_1	I_H	I_{γ}	I_B	M_H	n_H	R_{γ}	R_B	E_H
	кВт	В	о. е.	кВт		А			Нм	об/мин	Ом		В
1	40	220	0,9	-	-	-	-	-	-	800	0,1	55	-
2	-	-	-	2,5	12,5	114	-	-	-	1200	0,09	22	-
3	-	-	-	10	100	-	430	-	500	-	0,02	-	210
4	10	110	0,8	-	-	-	-	5	80	-	-	-	100
5	-	-	-	4,5	44,6	202	-	4	478	-	-	-	200
6	-	-	0,83	-	18	81,8	-	-	-	1510	0,15	122	-
7	-	220	0,85	-	-	100	-	-	-	2000	0,15	110	-
8	90	220	0,9	-	-	-	-	-	-	1720	-	8,8	210
9	16	-	-	-	22	-	98	2	89	-	-	-	205
10	15	220	-	3	-	-	80	-	95	-	-	-	208
11	10	-	-	2,5	-	-	-	1	80	-	200	0,08	-
12	-	220	0,86	-	10	-	-	-	-	1200	100	0,1	-
13	-	110	0,9	-	-	20	-	-	500	-	100	-	100
14	-	-	-	0,5	3,5	16	-	2	80	-	-	-	208
15	-	220	0,8	-	-	56,8	-	-	478	-	220	-	215
16	-	-	-	0,8	4,8	22	20	-	-	1510	-	-	210
17	3,2	110	-	-	3,8	-	-	-	-	2000	110	0,2	-
18	3	220	-	-	-	-	14	-	-	1720	110	0,852	-
19	-	-	-	0,22	2,2	-	19	1,1	89	-	-	0,53	-
20	8,6	-	-	2,4	-	-	43	2,2	95	-	-	-	215

Пример

- 1) двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением ;
- 2) номинальная мощность $P_H=32$ кВт;
- 3) номинальное напряжение $U_H=220$ В;

- 4) частота вращения якоря $n_H = 3000$ об/мин;
- 5) потребляемый из сети ток $I_H = 169$ А;
- 6) сопротивление обмотки возбуждения $R_B = 60$ Ом;
- 7) сопротивление обмотки якоря $R_я = 0,045$ Ом;

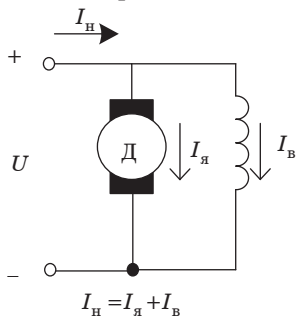


Рис. 2.13 Схема соединения обмотки

Требуется определить:

- 1) потребляемую из сети мощность P_1 , кВт;
- 2) КПД двигателя η_H , о.е.;
- 3) ток якоря и возбуждения $I_я$ и I_B , А;
- 4) противо-ЭДС в обмотке якоря E_H , В;
- 5) суммарные потери в двигателе ΣP_H , кВт.

Решение

Схема соединения обмотки имеет вид, представленный на рис. 2.13.

Потребляемая из сети мощность:

$$P_1 = U_H \cdot I_H = 220 \cdot 169 = 37200 \text{ (Вт)} = 37,2 \text{ (кВт)}.$$

КПД двигателя:

$$\eta_H = \frac{P_2}{P_1} = \frac{32000}{37200} = 0,86 \text{ (о.е.)} = 86 \text{ (\%)}.$$

Полезный вращающий момент (на валу):

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_H} = 9,55 \cdot \frac{32 \cdot 10^3}{3000} = 102 \text{ (Нм)}.$$

Ток возбуждения:

$$I_B = \frac{U_H}{R_B} = \frac{220}{66} = 3,66 \text{ (А)}.$$

Ток якоря:

$$I_я = I_H - I_B = 169 - 3,66 = 165,34 \text{ (А)}.$$

Противо-ЭДС в обмотке якоря:

$$E_H = U_H - I_я \cdot R_я = 220 - 165,34 \cdot 0,045 = 212,57 \text{ (В)}.$$

Суммарные потери в двигателе:

$$\Sigma P_H = P_1 - P_2 = 37,2 - 32 = 5,2 \text{ (кВт)}.$$

Практическая работа № 11.
Расчет параметров двигателя постоянного тока
с последовательным возбуждением

Используя приведенные в табл. 2.5 значения параметров двигателей постоянного тока с последовательным (серийным) возбуждением, нарисовать электрическую схему подключения обмотки двигателя и определить для каждого варианта значения параметров, величины которых не указаны в этой таблице.

Номинальное значение частоты сети переменного тока $f_c = 50$ Гц. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Исходные данные для задачи 11

№	P_H	U_H	η_H	ΣP_H	P_1	I_H	M_H	n_H	$R_{я} + R_{в}$	E_H
	кВт	В	о. е.	кВт		А	Нм	об/мин	Ом	В
1	17	110	0,82	-	-	-	-	800	-	100
2	-	250	0,78	2,2	-	-	-	900	-	241,2
3	-	-	0,88	-	31,2	142	-	1400	0,25	-
4	15	220	-	2	-	-	140	-	0,2	-
5	10	-	0,91	-	-	100	-	1200	0,08	-
6	-	-	-	3,7	20,7	188	203	-	0,053	-
7	-	220	0,88	-	-	77,3	-	100	-	205,5
8	7,5	-	-	-	10	40	-	900	0,22	-
9	-	110	-	1	11	-	79,5	-	-	102
10	27,4	220	-	3,8	-	-	187	-	-	184,5
11	-	-	-	-	10	45,5	48	1600	-	208
12	-	110	-	0,65	4,32	-	35	-	0,255	-
13	1,78	110	0,81	-	-	-	-	1000	-	105
14	4	-	-	-	4,5	20,5	-	1800	0,55	-
15	-	250	0,843	-	-	-	234	474	0,61	-
16	-	-	0,85	-	-	39,3	35	1000	-	100
17	8	220	-	1,95	-	-	48	-	0,264	-
18	-	-	-	-	2,2	20	17	1000	0,25	-
19	-	220	0,89	0,5	-	-	21,2	-	-	208,7
20	11,6	-	-	2,2	-	55,2	-	474	-	216,3

Пример

- 1) двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением;
- 2) номинальная мощность $P_H = 12$ кВт;

- 3) номинальное напряжение $U_H = 220$ В;
- 4) частота вращения якоря $n_H = 675$ об/мин;
- 5) потребляемый из сети ток $I_H = 69$ А;
- 6) сопротивление обмотки якоря и последовательно соединённое сопротивление $R_{\text{я}} + R_{\text{в}} = 0,4$ Ом

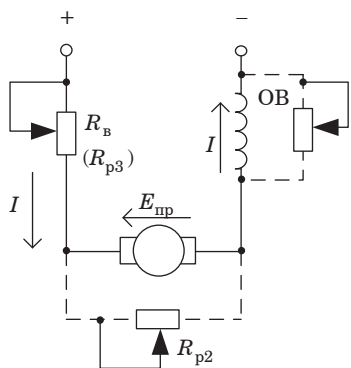


Рис. 2.14

Требуется определить:

- 1) потребляемую из сети мощность P_1 , кВт;
- 2) КПД двигателя η_H , о.е.;
- 3) ток якоря и возбуждения $I_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$, А;
- 4) противо-ЭДС в обмотке якоря E_H , В;
- 5) суммарные потери в двигателе ΣP_H , кВт.

Решение:

Схема соединения обмотки имеет вид, представленный на рис. 2.14.

Номинальный ток якоря равен номинальному току возбуждения:

$$I_H = I_{\text{я}} = I_{\text{в}} = 69 \text{ (А)}.$$

Потребляемая из сети мощность:

$$P_1 = U_H \cdot I_H = 220 \cdot 69 = 15180 \text{ (Вт)} = 15,18 \text{ (кВт)}.$$

КПД двигателя:

$$\eta_H = \frac{P_2}{P_1} = \frac{12000}{15180} = 0,791 \text{ (о.ед)} = 79\%.$$

Полезный вращающий момент (на валу):

$$M_H = 9,55 \frac{P_2}{n_H} = 9,55 \frac{12 \cdot 10^3}{675} = 169,78 \text{ (Нм)}.$$

Противо-ЭДС в обмотке якоря:

$$E_H = U_H - I_{\text{я}} \cdot \Sigma R_{\text{я}} = 220 - 69 \cdot 0,4 = 192,4 \text{ (В)}.$$

Суммарные потери в двигателе:

$$\Sigma P_H = P_1 - P_2 = 15,18 - 12 = 3,18 \text{ (кВт)}.$$

Практическая работа № 12. Построение обмотки якоря

Обмотка якоря постоянного тока содержит элементарных пазов $Z_{эл}$, при числе полюсов $2p$. По данным, приведённым в табл. 2.9, рассчитать параметры и начертить развёрнутую схему простой волновой (ПВ) либо простой петлевой (ПП) обмотки якоря.

На схеме обозначить полюсы, расставить щётки и, задавшись направлением вращения якоря, определить полярность щеток в генераторном режиме работы машины.

Значения перечисленных параметров приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Исходные данные для задачи 12

Параметр	Варианты для типов обмоток									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ПВ	ПВ	ПВ	ПП	ПВ	ПП	ПВ	ПП	ПВ	ПП
$Z_{эл}$	21	25	33	32	23	24	29	30	27	28
$2p$	4	6	8	4	4	8	4	6	4	6

Пример

Рассчитать параметры и выполнить простую волновую обмотку с параметрами: $2p = 4$ и $Z_{эл} = 17$.

Решение:

Шаг обмотки по коллектору (обмотка левоходная):

$$y_k = y = \frac{K - 1}{p} = \frac{17 - 1}{2} = 8 \text{ (дел.)}.$$

Первый шаг обмотки по пазам:

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p} \pm \xi = \frac{17}{4} - 0,25 = 4 \text{ (паза)}.$$

Строим развёрнутую схему обмотки.

На листе размечаем 17 пазов, в каждом из которых изображаем активную сторону верхнего слоя (сплошная линия) и активную сторону нижнего слоя (пунктирная линия) и 17 коллекторных делений.

Первый обход по якорю и коллектору начинаем с коллекторного деления 1 и укладываем секции 1 и 9, активные стороны которых располагаются в пазах 1, 5, 9 и 13.

Конец секции 9 присоединяем к коллекторному делению 17, расположенному рядом (слева) с делением 1.

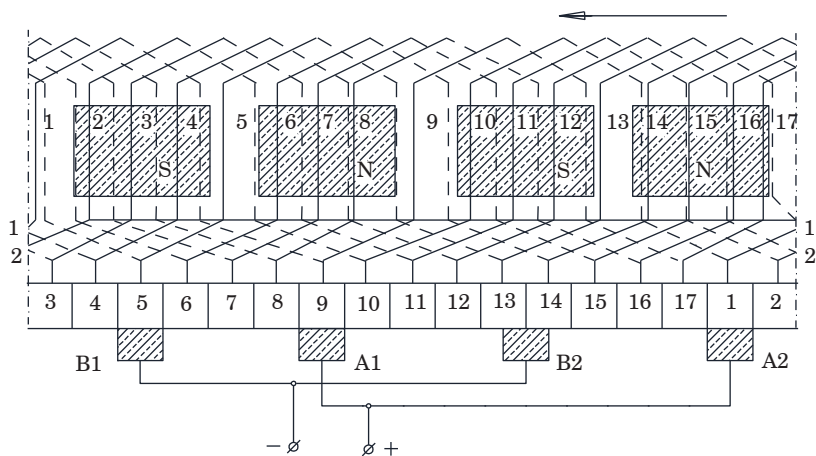


Рис. 2.15 Простая волновая обмотка

Затем делаем второй обход и укладываем секции 17 и 8, которую присоединяем к коллекторному делению 16, т. е. смещаемся еще на одно коллекторное деление влево.

Затем делаем третий обход и т. д., пока обмотка не замкнется, при этом последнюю по обходу секцию 10 присоединяем к секции 1 и коллекторному делению 1.

Затем размечаем четыре полюса с чередующейся полярностью и располагаем на коллекторе щетки, размещая их по геометрической нейтрالي.

Задавшись направлением вращения якоря, определяем направление ЭДС в секциях обмотки, считая, что полюсы «расположены» над обмоткой. Пример построения обмотки на рис. 2.15.

Практическая работа № 13. Построение механической характеристики электродвигателя

Для заданного варианта задачи определить время переходного процесса $t_{п.п}$, за которое скорость ЭП изменится от $\Omega_{нач}$ до $\Omega_{кон}$ при заданных значениях:

- 1) момента, развиваемого электродвигателем M_d , Н·м
- 2) момента сопротивления нагрузки M_c , Н·м
- 3) момента инерции нагрузки J_3 кг·м²

1. Построить график механического переходного процесса.

Исходные данные для задачи № 13

Вариант	$\Omega_{\text{нач}}$, рад/с	$\Omega_{\text{кон}}$, рад/с	$M_{\text{д}}$, Н·м	$M_{\text{с}}$, Н·м	$J_{\text{э}}$, кг·м ²
1	90	110	60	40	1
2	100	130	75	60	2
3	110	130	85	65	3
4	120	150	90	75	2
5	110	150	100	60	6
6	100	160	110	90	2
7	90	160	130	60	1
8	80	170	150	105	2
9	60	80	30	10	5
10	70	90	40	20	2,5

Пример

Данные необходимые для расчёта представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Исходные данные для задачи

Вариант	$\Omega_{\text{нач}}$, рад/с	$\Omega_{\text{кон}}$, рад/с	$M_{\text{д}}$, Н·м	$M_{\text{с}}$, Н·м	$J_{\text{э}}$, кг·м ²
–	25	175	120	20	4,0

Исходное уравнение движения электропривода в общем случае имеет вид, описываемый выражением:

$$\pm M \pm M_{\text{с}} = J \frac{d\Omega}{dt},$$

где M – механический момент, Нм; $M_{\text{с}}$ – момент сопротивления, Нм; J – момент инерции, кг·м².

Правило, по которому определяются эти знаки, следующее: если направление действия момента совпадает с направлением скорости, то такой момент считается положительным, и наоборот.

В нашем случае двигатель создаёт вращающий момент, а нагрузка «сопротивляется» вращению, поэтому исходное уравнение примет вид, как на формуле:

$$M_{\text{д}} - M_{\text{с}} = J_{\text{э}} \frac{d\Omega}{dt},$$

где $M_{\text{д}}$ – момент, развиваемый электродвигателем, Нм; $J_{\text{э}}$ – момент инерции нагрузки, кг·м²

Будем полагать, что динамический момент постоянен и неотрицателен.

В таком случае уравнение движения решается методом разделения переменных.

Решим его:

$$M_{\text{д}} - M_{\text{с}} = J_{\text{э}} \frac{d\Omega}{dt} \Leftrightarrow$$

$$\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} = \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{т.к. } J_{\text{э}} \neq 0) \Leftrightarrow$$

$$\left[\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} \right] dt = d\Omega \Leftrightarrow$$

$$\left[\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} \right] \int dt = \int d\Omega \quad \left(\text{т.к. } \frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} = \text{const} \right) \Leftrightarrow$$

$$\Omega = \left[\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} \right] \cdot t + C.$$

Аддитивная постоянная C может быть найдена из начальных условий.

Будем полагать, что в момент времени $t = t_0 = 0$ скорость вращения составляла $\Omega = \Omega_{\text{нач}}$, тогда:

$$\Omega_{\text{нач}} = \left[\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} \right] \cdot 0 + C = C.$$

Откуда, решение уравнения будет описываться формулой:

$$\Omega(t) = \Omega_{\text{нач}} + \left[\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} \right] \cdot t.$$

Очевидно, что время переходного процесса будет выражаться формулой:

$$t_{\text{п.п}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{нач}}}{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}.$$

К этому результату можно было прийти и другим путём. Если положить, что за промежуток времени от $t_{\text{нач}}$ до $t_{\text{кон}}$ скорость из-

менится от $\Omega_{\text{нач}}$ до $\Omega_{\text{кон}}$, то уравнение движения может быть решено в определённых интегралах:

$$\left[\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} \right] \cdot \int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{кон}}} dt = \int_{\Omega_{\text{нач}}}^{\Omega_{\text{кон}}} d\Omega \Leftrightarrow$$

$$\left[\frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}} \right] \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) = (\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{нач}}) \Leftrightarrow$$

$$t_{\text{п.п}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{нач}}}{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}.$$

Решение:

Рассчитаем время переходного процесса:

$$t_{\text{п.п}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{нач}}}{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}} = 4,0 \cdot \frac{175 - 25}{120 - 20} = 6 \text{ (с)}.$$

Построим график переходного процесса, в нашем случае этот график описывается уравнением $\Omega(t) = 25 \cdot (1 + t)$. Построенный график приведён на рис. 2.16.

Сведём данные, полученные в ходе расчёта, в табл. 2.9

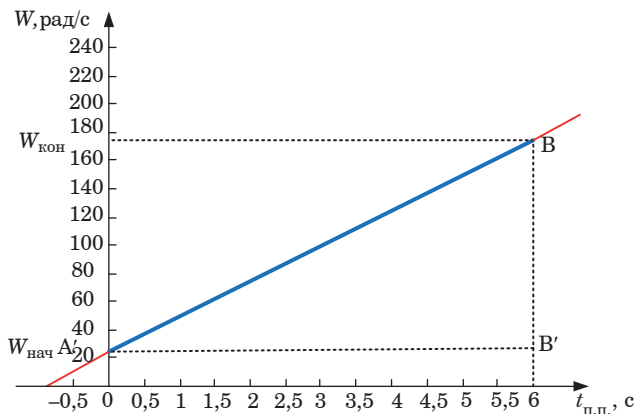


Рис. 2.16. График механического переходного процесса

Таблица 2.9

Таблица результатов расчёта

$t_{\text{п.п.}} \text{ с}$	$\Omega_{\text{нач}} \text{ рад/с}$	$\Omega_{\text{кон}} \text{ рад/с}$	$M_{\text{д}} \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M_{\text{с}} \text{ НЧ}$	$J_{\text{э}} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
6,0	25	175	120	20	4,0

Практическая работа № 14. Построение кривых переходного процесса

Для заданного варианта задачи:

1. выполнить расчет и построение кривых переходного процесса $W(t)$ и $M(t)$ при линейной механической характеристике двигателя;
2. оценить практическое время переходного процесса.

Таблица 2.10

Исходные данные для задачи 14

Вариант	Ω_0 , рад/с	$\Omega_{нач}$, рад/с	$\Omega_{уст}$, рад/с	$M_{нач} = M_{кз}$, Н·м	$M_{уст} = M_c$, Н·м	J , кг·м ²
1	30	155	200	150	30	0,2
2	50	160	210	150	35	0,1
3	50	165	210	150	40	0,2
4	50	170	220	150	35	0,3
5	50	180	220	150	35	0,4
6	50	175	220	140	30	0,5
7	60	170	220	140	30	0,4
8	60	165	220	140	35	0,3
9	60	160	210	140	35	0,2
10	60	155	200	140	40	0,1

Пример:

Данные необходимые для расчёта представлены в табл. 2.11

Таблица 2.11

Исходные данные для задачи

Вариант	Ω_0 , рад/с	$\Omega_{нач}$, рад/с	$\Omega_{уст}$, рад/с	$M_{нач} = M_{кз}$, Н·м	$M_{уст} = M_c$, Н·м	J , кг·м ²
-	200	40	150	130	30	0,3

Для заданного варианта задачи:

1. выполнить расчет и построение кривых переходного процесса $W(t)$ и $M(t)$ при линейной механической характеристике двигателя;
2. оценить практическое время переходного процесса.

Исходное уравнение движения электропривода в общем случае имеет вид, описываемый выражением:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\Omega}{dt},$$

где M – механический момент, Н·м; M_c – момент сопротивления, Нм; J – момент инерции, кг·м².

Правило, по которому определяются эти знаки, следующее: если направление действия момента совпадает с направлением скорости, то такой момент считается положительным, и наоборот.

В нашем случае двигатель создаёт вращающий момент, а нагрузка «сопротивляется» вращению, поэтому исходное уравнение примет вид, как на формуле:

$$M_d - M_c = J_э \frac{d\Omega}{dt},$$

где M_d – момент, развиваемый электродвигателем, Н·м; $J_э$ – момент инерции нагрузки, кг·м².

Однако, момент, развиваемый электродвигателем (вращающий момент), и момент исполнительного органа могут быть найдены по формуле:

$$M_d = M_{кз} - \beta \cdot \Omega, \quad M_{ио} = M_{со} + \beta_c \cdot \Omega,$$

где $M_{кз}$ – момент двигателя при нулевой скорости, Н·м; $M_{со}$ – момент $M_{ио}$ при нулевой скорости, Н·м; β – модуль жесткости механических характеристик, Нмс/рад.

Откуда, уравнение движения может быть записано как:

$$M_d - M_c = J_э \frac{d\Omega}{dt} \Leftrightarrow M_{кз} - \beta \cdot \Omega - M_{со} - \beta_c \cdot \Omega = J_э \frac{d\Omega}{dt} \Leftrightarrow$$

$$(M_{кз} - M_{со}) - \Omega(\beta + \beta_c) = J_э \frac{d\Omega}{dt} \Leftrightarrow \frac{M_{кз} - M_{со}}{\beta + \beta_c} = \frac{J_э}{\beta + \beta_c} \cdot \frac{d\Omega}{dt} + \Omega.$$

Введём следующие обозначения:

$\frac{M_{кз} - M_{со}}{\beta + \beta_c} = \Omega_{уст}$ – установившаяся скорость, соответствующая точке пересечения характеристик двигателя и исполнительного органа; $\frac{J_э}{\beta + \beta_c} = T_M$ – электромеханическая постоянная времени ЭП.

Тогда уравнение примет вид, описываемый выражением:

$$T_M \cdot \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \Omega_{уст}.$$

В общем виде дифференциальное уравнение, описывающее любой переходной процесс, выглядит как на выражении:

$$A_n \frac{d^n}{dt^n} f(x) + \dots + A_1 \frac{d}{dt} f(x) + A_0 f(x) = \xi(t),$$

где $\xi(t)$ – воздействие источника, вызвавшее переходной процесс; $A_n \dots A_0$ – линейные коэффициенты; $f(x)$ – изменяющийся параметр.

Как известно общее решение неоднородного дифференциально-го уравнения ищут как суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения, т. е.:

$$f(t) = f_{\text{пр}}(t) + f_{\text{св}}(t).$$

Поиск принуждённой составляющей, т. е. частного решения неоднородного дифференциального уравнения обычно не составляет труда. В качестве таковой часто принимают значение параметра в стационарном режиме (в нашем случае это – установившееся значение).

Для поиска свободной составляющей как раз и необходима система дифференциально-интегральных уравнений в нормальной форме Коши. Такая система должна быть однородной. А для существования решения однородной СЛАУ необходимо и достаточно, чтобы определитель её главной матрицы равнялся нулю.

В нашем случае достаточно одного уравнения.

Найдём свободную составляющую. Характеристическое уравнение имеет вид:

$$T_M \cdot p + 1 = 0.$$

Тогда его корень:

$$p = -\frac{1}{T_M}.$$

Откуда общее решение однородного уравнения:

$$f_{\text{св}}(t) = Ae^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Тогда, результирующее решение следует писать в виде:

$$\Omega(t) = Ae^{-\frac{t}{T_M}} + \Omega_{\text{уст}}.$$

Найдём коэффициент А из начальных условий:

$$\Omega(0) = \Omega_{\text{нач}} = Ae^{-\frac{0}{T_M}} + \Omega_{\text{уст}} \Rightarrow A = \Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}.$$

Откуда, функция угловой скорости будет описываться уравнением:

$$\Omega(t) = (\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} + \Omega_{\text{уст}}.$$

Очевидно, что зависимость для момента будет выражаться уравнением:

$$M(t) = (M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{\text{уст}}.$$

Найдём время переходного процесса:

$$\begin{aligned} \Omega(t_{\text{п.п}}) &= (\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t_{\text{п.п}}}{T_M}} + \Omega_{\text{уст}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{уст}} &= (\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t_{\text{п.п}}}{T_M}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln[\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{уст}}] &= -\frac{t_{\text{п.п}}}{T_M} \ln[\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow t_{\text{п.п}} &= T_M \ln \left[\frac{\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}}{\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{уст}}} \right], \\ t_{\text{п.п}} &= T_M \ln \left[\frac{\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}}{\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{уст}}} \right] \approx 3T_M. \end{aligned}$$

Решение:

Изначально, рассчитаем электромагнитную постоянную времени

$$T_M = J_{\text{э}} \frac{\Omega_0}{M_{\text{кз}}} = 0,3 \cdot \frac{200}{130} = 0,462 \text{ (с)}.$$

Откуда, переходной процесс угловой скорости будет описываться функцией:

$$\begin{aligned} \Omega(t) &= (\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} + \Omega_{\text{уст}} = \\ &= (40 - 150) e^{-\frac{t}{0,462}} + 150 = -110 e^{-2,167t} + 150. \end{aligned}$$

Переходной процесс момента, будет описываться функцией:

$$M(t) = (M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{\text{уст}} =$$

$$= (130 - 30) e^{-2,167t} + 30 = 100e^{-2,167t} + 30.$$

Время переходного процесса может быть оценено как:

$$t_{\text{п.п}} = T_M \ln \left[\frac{\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}}}{\Omega_{\text{кон}} - \Omega_{\text{уст}}} \right] \approx 3T_M = 3 \cdot 0,462 = 1,386 \text{ (с)}.$$

Сведём полученные в ходе расчёта данные в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Результаты расчёта

Вариант	Ω_0 , рад/с	$\Omega_{\text{нач}}$, рад/с	$\Omega_{\text{уст}}$, рад/с	$M_{\text{нач}} = M_{\text{кз}}$, Н·м	$M_{\text{уст}} = M_c$, Н·м	$J_{\text{э}}$, кг·м ²
ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
–	200	40	150	130	30	0,3
РАСЧЁТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
Функция угл. скорости		Функция момента			Время пп, с	
$\Omega(t) = -110e^{-2,167t} + 150$		$M(t) = 100e^{-2,167t} + 30$			1,386	

Графики переходных процессов представлены на рис. 2.17

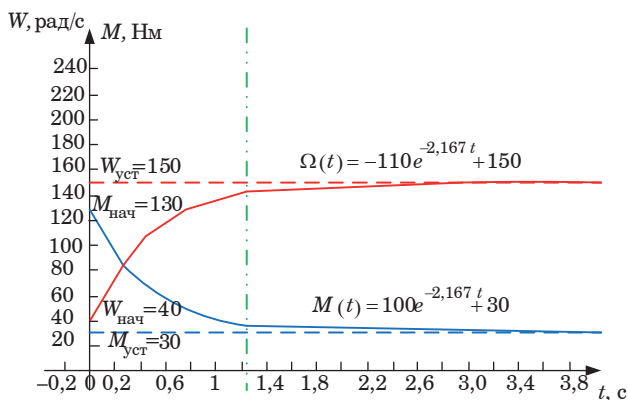


Рис. 2.17. Графики переходных процессов

На рис. 2.17 синим цветом отображён переходной процесс момента, а красным – угловой скорости.

Из полученных уравнений и графиков видно, что установившиеся значения момента и скорости равны $M_{уст} = 30$ Нм и $\Omega_{уст} = 150$ (рад/с), соответственно. Также можно утверждать, что скорость достигнет установившегося значения за время 1,386 с, точнее говоря установившееся значение попадает в коридор $140 \leq \Omega_{уст} \leq 150$ (рад/с).

Практическая работа № 15.

Электромеханические характеристики двигателя

Для заданного варианта задачи необходимо рассчитать и построить электромеханические характеристики (табл. 2.13):

- 1) при динамическом торможении;
- 2) рекуперативном торможении;
- 3) торможении противовключением.

1. При расчете каждой электромеханической характеристики необходимо рассчитать значение добавочного сопротивления цепи обмотки якоря $R_{доб}$, обеспечивающего заданное значение тока якоря $I_{доп.т}^* = I_{доп.т} / I_{ян}$.

Таблица 2.13

Исходные данные для задачи 15

Вариант	Тип двигателя	$I_{доп.т}^*$ о.е.	$P_{ном}$ Вт	$n_{ном}$ об/мин	$I_{ян}$, А	$U_{ян}$, В	$R_{ян}$, Ом	$J_d \cdot 10^{-6}$, кг·м ²
1	МИ-22-1	1,5	370	3000	8,2	60	0,195	4000
2	МИ-22-2	1,5	250	2000	5,5	60	0,36	4000
3	МИ-22-3	2,0	120	1000	2,6	60	1,44	4000
4	МИ-22-4	2,5	370	3000	4,4	110	0,546	4000
5	МИ-22-5	1,5	250	2000	2,9	110	1,29	4000
6	МИ-22-6	2,0	120	1000	1,4	110	4,58	4000
7	МИ-31-1	2,5	450	3000	10,3	60	0,204	9000
8	МИ-31-2	1,5	370	2000	8,2	60	0,406	9000
9	МИ-31-3	2,0	200	1000	4,4	60	1,32	9000
10	МИ-31-4	2,5	450	3000	5,6	110	0,585	9000

Пример:

Данные необходимые для расчёта представлены в табл. 2.14

Исходные данные для задачи

Вариант	Тип двигателя	I^* доп.т. о.е.	$P_{\text{ном}}$ Вт	$n_{\text{ном}}$ об/МИН	$I_{\text{я}}$ А	$U_{\text{я}}$ В	$R_{\text{я}}$ Ом	$J_{\text{д}} \cdot 10^{-6}$, кг·м ²
13	ДСПЯ- 1,5	2,5	1500	4000	95	23	0,03	470

1. Для заданного варианта задачи необходимо рассчитать и построить электромеханические характеристики:

- 1) при динамическом торможении;
- 2) рекуперативном торможении;
- 3) торможении противовключением.

2. При расчете каждой электромеханической характеристики необходимо рассчитать значение добавочного сопротивления цепи обмотки якоря $R_{\text{доб}}$, обеспечивающего заданное значение тока якоря.

Уравнение равновесия напряжения цепи обмотки якоря, ЭДС якоря и электромагнитного момента для установившегося режима работы двигателя без учета реакции якоря и механических потерь имеют вид:

$$U_{\text{я}} = E + IR_{\text{я}},$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение якорной цепи, В; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря, Ом.

$$E = \Omega \cdot C_e \cdot \Phi,$$

где C_e – конструктивный коэффициент двигателя, о.е.; Φ – магнитный поток, Вб.

$$M = I \cdot C_M \cdot \Phi.$$

Режим динамического торможения (генераторный режим независимо от сети) происходит при отключении якоря двигателя от сети и замыкании его на внешнее сопротивление (обмотка возбуждения остается подключенной к сети). При этом кинетическая энергия, запасенная в двигателе и в движущихся частях приводного механизма, преобразуется в электрическую энергию и выделяется в виде тепла в сопротивлениях цепи якоря, то есть машина будет работать в режиме генератора, создавая тормозной момент.

Соответственно, искусственная электромеханическая характеристика при динамическом торможении, т. е. когда $U_{\text{я}} = 0$ будет описываться выражением:

$$\Omega(I) = - \left(\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д2}}}{C_e \Phi} \right) I,$$

где $R_{д2}$ – добавочное сопротивление в цепи якоря, Ом.

Вследствие того, что ЭДС двигателя сохраняет при торможении такой же знак, как и в двигательном режиме, а напряжение извне к якорю не прикладывается, ток якоря определяется по формуле:

$$I_{я} = \frac{E}{R_{я} + R_{д2}}.$$

Величина тормозного добавочного сопротивления рассчитывается из условия, чтобы при номинальной скорости вращения якоря его ток не превышал бы допустимого значения $I_{доп}$ по условиям коммутации:

$$R_{д2} = \frac{E_{\text{макс}}}{I_{\text{доп}}} - R_{я} \approx \frac{U_{я}}{I_{\text{доп}}} - R_{я}.$$

Режим торможения противовключением (генераторный режим последовательно с сетью) получается в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположную сторону. Электромеханическая характеристика такого режима описывается уравнением:

$$\Omega(I) = -\frac{U_{я}}{C_e \Phi} + \left(\frac{R_{я} + R_{д3}}{C_e \Phi} \right) I.$$

Величина добавочного сопротивления будет определяться формулой:

$$R_{д3} = \frac{U + E_{\text{макс}}}{I_{\text{доп}}} - R_{я} \approx \frac{2U_{я}}{I_{\text{доп}}} - R_{я}.$$

Режим рекуперативного торможения (генераторный режим параллельно с сетью) осуществляется в том случае, когда скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода и его ЭДС больше приложенного напряжения сети. При этом двигатель работает генератором параллельно с сетью, которой он отдаёт электрическую энергию; ток якоря двигателя изменяет свое направление; изменяет свое направление и момент.

Электромеханическая характеристика такого режима описывается уравнением:

$$\Omega(I) = \frac{U_{я}}{C_e \Phi} + \left(\frac{R_{я}}{C_e \Phi} \right) I.$$

Решение:

Коэффициент ЭДС и коэффициент момента двигателя равны:

$$C_e \Phi = C_M \Phi = \frac{M_{\text{ном}}}{I_{\text{я. ном}}} = \frac{P_{\text{ном}}}{I_{\text{я. ном}} \Omega_{\text{ном}}} = \frac{30 P_{\text{ном}}}{\pi I_{\text{я. ном}} n_{\text{ном}}} =$$

$$= \frac{30 \cdot 1500}{\pi \cdot 95 \cdot 4000} = 0,038 \text{ (о.е.)}.$$

Рассчитаем добавочное сопротивление для динамического торможения:

$$R_{\text{д2}} = \frac{U_{\text{я}}}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}} = \frac{23}{2,5 \cdot 95} - 0,03 = 0,0668 \text{ (Ом)}.$$

Тогда уравнение электромеханической характеристики будет:

$$\Omega(I) = - \left(\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д2}}}{C_e \Phi} \right) I = - \frac{0,03 + 0,0668}{0,038} I = -2,547I.$$

Рассчитаем добавочное сопротивление для торможения противовключением:

$$R_{\text{д3}} = \frac{2U_{\text{я}}}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}} = \frac{2 \cdot 23}{2,5 \cdot 95} - 0,03 = 0,1637 \text{ (Ом)}.$$

Тогда уравнение электромеханической характеристики будет:

$$\Omega(I) = - \frac{U_{\text{я}}}{C_e \Phi} + \left(\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д3}}}{C_e \Phi} \right) I =$$

$$= - \frac{23}{0,038} + \frac{0,03 + 0,1637}{0,038} I = -605,26 + 5,097I.$$

Уравнение электромеханической характеристики для режима рекуперативного торможения будет иметь вид:

$$\Omega(I) = \frac{U_{\text{я}}}{C_e \Phi} + \left(\frac{R_{\text{я}}}{C_e \Phi} \right) I = \frac{23}{0,038} + \frac{0,03}{0,038} I = 605,26 + 0,7895I.$$

Сведём полученные в ходе расчёта данные в табл. 2.15.

Электромеханические характеристики при динамическом торможении и торможении противовключением с учётом ввода добавочного сопротивления $R_{\text{доб2}}$ и $R_{\text{доб3}}$ представлены на рис. 2.18 и рис. 2.19.

Результаты расчёта

Тип	I^* доп.т. о.е.	$P_{\text{НОМ}}$ Вт	$n_{\text{НОМ}}$ об/мин	$I_{я}$, А	$U_{я}$, В	$R_{я}$, Ом	$J_{д} \cdot 10^{-6}$, кг·м ²
ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ							
-	*	2,5	1500	4000	95	23	0,03
РАСЧЁТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ							
Дин.	Противовкл.	Рекупер.	$R_{\text{доб2}}$, мОм				
$\Omega(I) = -2,547I$	$\Omega(I) = -605,26 + 5,097I$	$\Omega(I) = 605,26 + 0,7895I$	66,8				

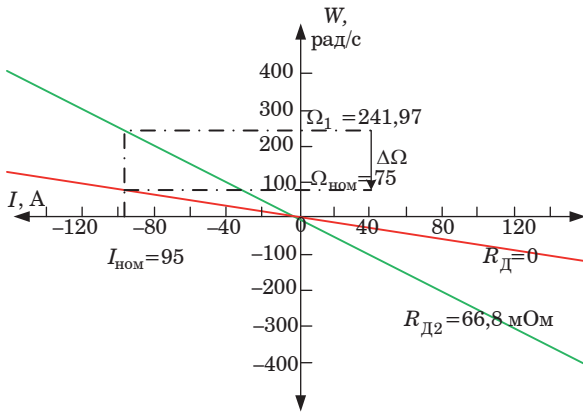


Рис. 2.18. Электромеханические характеристики дин. торможения

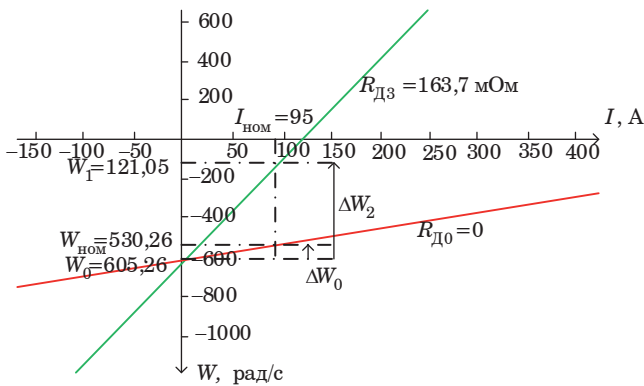


Рис. 2.19. Электромеханические характеристики торможения противовключением

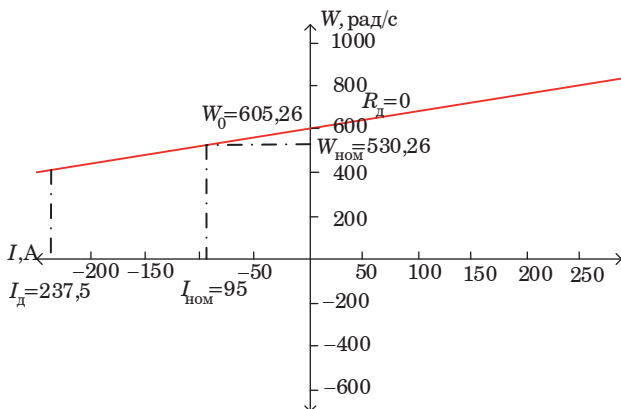


Рис. 2.20. Электромеханическая характеристики рекуперативного торможения

Электромеханическая характеристика при рекуперативном торможении представлена на рис. 2.20.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрические машины в форме генераторов производят практически всю электроэнергию на Земле, а в форме электродвигателей потребляют примерно 60% всей производимой электроэнергии. Электрические машины были разработаны в середине XIX века и с тех пор стали неотъемлемым компонентом инфраструктуры во всем мире. Разработка более эффективных технологий электрических машин имеет решающее значение для любой глобальной стратегии энергосбережения, экологически чистой энергии или альтернативной энергетики, чему и будет посвящено следующее учебно-методическое пособие авторского коллектива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности конструкции современных турбогенераторов / Наука и жизнь. № 6 1978 г. «Исполн энергетике».
2. Турбогенераторы с воздушным охлаждением. URL: <https://elsib.ru/ru/turbogenerator-s-vozdushnym-ohlazhdeniem/>
3. *Кацман М. М.* Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / 12-е изд. стер. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 496 с.
4. *Мартынов А. А., Тимофеев С. С.* Электрические машины постоянного тока: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2016. 55 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Трансформатор	7
1.1. Однофазные трансформаторы	7
1.2. Принцип действия трансформатора	7
1.3. Законы трансформации	8
1.4. Реальный трансформатор	10
1.5. Конструктивные особенности трансформаторов	13
1.6. Основные определения и расчетные соотношения	18
1.7. Энергетические характеристики	26
1.8. Схемы замещения трансформаторов	27
Практические работы к 1 разделу	31
Практическая работа № 1. Расчет однофазного трансформатора	31
Практическая работа № 2. Расчет сердечника трансформатора	35
Практическая работа № 3. Расчет трехфазного трансформатора	39
Практическая работы № 4. Расчет двухобмоточного трансформатора	41
Практическая работы № 5. Расчет параметров трехфазного трансформатора	43
Практическая работа № 6. Расчет автотрансформатора	45
2. Электрические машины постоянного тока	48
2.1. Принцип действия	48
2.2. Устройство коллекторной машины постоянного тока	50
2.3. Магнитное поле машины постоянного тока	55
2.4. Учет размагничивающего влияния реакции якоря	59
2.5. Способы возбуждения машин постоянного тока	61
2.6. Торможение электродвигателей постоянного тока	62
2.7. Основные законы машин постоянного тока	63
2.8. Введение дополнительного сопротивления в цепь якоря	66
2.9. Потери в машинах постоянного тока	68
2.10. Коэффициент полезного действия	70
Практические работы к 2 разделу	72
Практическая работа № 7. Учет размагничивающего влияния реакции якоря	72

Практическая работа № 8. Определение параметров ДПТ параллельного возбуждения	74
Практическая работа № 9. Анализ работы двигателя постоянного тока	77
Практическая работа № 10. Расчет параметров двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.....	79
Практическая работа № 11. Расчет параметров двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением...	81
Практическая работа № 12. Построение обмотки якоря	83
Практическая работа № 13. Построение механической характеристики электродвигателя.....	84
Практическая работа № 14. Построение кривых переходного процесса	88
Практическая работа № 15. Электромеханические характеристики двигателя	93
Заключение	99
Список литературы.....	100