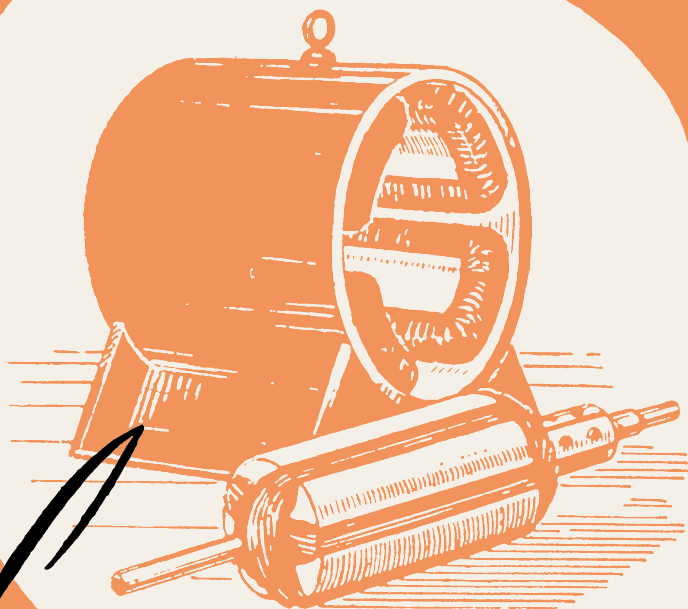


*Н. В. Виноградов*



*Как самому*  
РАССЧИТАТЬ  
И СДЕЛАТЬ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Г О С Э Н Е Р Г О И З Д А Т

Н. В. ВИНОГРАДОВ

КАК САМОМУ РАССЧИТАТЬ  
И СДЕЛАТЬ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ



Scan AAW



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

---

---

Книжка является пособием для школьников старших классов, интересующихся электротехникой.

В ней рассказано о работе электродвигателей малой мощности (микродвигателей) постоянного и переменного тока, изложены упрощенные методы расчета этих двигателей с числовыми примерами расчетов; даны указания по конструированию, самостоятельному изготовлению двигателей и применению их для движущихся моделей; кратко описаны основы производства микродвигателей на заводах. В конце даны расчет и способы изготовления трансформатора для питания электродвигателей.

Автор *Николай Владимирович Виноградов*

КАК САМОМУ РАССЧИТАТЬ  
И СДЕЛАТЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Редактор *В. И. Тимохина*

Техн редактор *Л. Я. Медведев*

Сдано в пр-во 15-III 1958 г.

Подписано к печати 20 V 1958 г.

Бумага 4×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>

8,20 п. л.

Уч.-изд. л. 9,3

1-085231

Тираж 41 000 экз.

Цена 3 р. 75 к.

Зак. 1142

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

---

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Наша молодежь активно участвует в технической самодеятельности в домах пионеров и на станциях юных техников, проводя практические занятия по машиноведению и электротехнике по учебным программам средней школы и самостоятельно моделируя в домашних условиях. Многие строят радиоприемники, патефоны, электропроигрыватели, киноаппараты, магнитофоны, модели самолетов с механическими и бензиновыми двигателями, кораблей, экскаваторов и многих других механизмов, за которые часто присуждаются премии на конкурсах.

Что же касается такого относительно простого устройства, каким является электродвигатель, то об этом, как будто, и говорить нечего. Поэтому многие способные школьники, чтобы усложнить задачу, строят, например, рекордно маленькие электродвигатели, помещающиеся на ногте. Это, конечно, интересно, но здесь моделист уклоняется в область приборостроения. А самодельный *электродвигатель* должен обладать некоторой силой, он должен *двигать* механизмы, с которыми связан, иначе он не будет оправдывать своего названия.

Литература по самодельным электродвигателям малой мощности (микродвигателям), к сожалению, ориентирует главным образом на примитивные макеты двигателей с деталями магнитопровода, согнутыми из полосок жести. На таком макете можно лишь продемонстрировать принцип действия двигателя, а не получать от него какую-нибудь механическую работу. Между тем в школьных механических мастерских моделисты могут выполнять некоторые операции на токарных и сверлильных станках. Благодаря этому можно построить более «мощные» двигатели, способные приводить во вращение не только модели, но и настоящие швейные машины, вентиляторы, электропроигрыватели.

Обычно в литературе по самодельным электродвигате-

лям преподносят готовые рецепты изготовления двигателя; приведены размеры всех деталей и данные обмоток. Остается лишь выполнить детали и собрать двигатель.

В этой книжке нет готовых рецептов. Даются только направляющие указания. Поэтому придется не только делать, но и думать о расчете двигателя, о его конструкции и о способах изготовления. Таким образом, юный техник может справедливо заявить, что он не только сделал, но и создал электродвигатель,— это его расчет, его конструкция и его изготовление.

Эта книжка не только для умелых рук, но и для пытливого ума. В ней читатель найдет ответы на тысячи «почему», которые у него могут возникнуть в области работы и устройства электродвигателей. На основе теоретических данных из раздела физики «Электричество» здесь рассказано, как работают электродвигатели постоянного и переменного тока. Далее читатель узнает, что, пользуясь алгеброй и основами тригонометрии, можно рассчитать двигатель, т. е. определить все его размеры.

В книге также рассказано о производстве электродвигателей на заводах и даны советы, как изготовить рассчитанный двигатель упрощенными способами. Затем изложены примеры применения построенного электродвигателя для приведения в движение различных механизмов или их моделей. Учитывая, что наибольшее распространение имеют электродвигатели переменного тока, в конце даются расчет и конструкция понижающего трансформатора.

Приходя на производство по окончании средней школы, молодежь обладает хорошей общеобразовательной подготовкой, но не имеет многих практических знаний, необходимых для выполнения квалифицированных работ. Учебники по прикладным наукам, издаваемые для высших и средних технических учебных заведений, слишком сложны для самостоятельного изучения.

Овладев знаниями, полученными в этой книжке, можно перейти к изучению технической литературы по теории и проектированию электрических машин. Таким образом, книжка может служить переходным мостиком от средней школы к технической литературе.

В этой книжке принята нумерация параграфов, рисунков, формул и таблиц, которая широко применяется в технической литературе и не встречалась в учебниках для средней школы. Каждый номер состоит из двух цифр. Пер-

вая цифра означает номер главы, а вторая, напечатанная через черточку, означает порядковый номер параграфа или формулы в этой главе. Так, например, если в тексте имеется ссылка на параграф 5-9, то ищите его в пятой главе после параграфа 5-8. То же самое относится к номерам рисунков, формул и таблиц.

В тексте книжки будут встречаться сокращенные обозначения. Чтобы понимать прочитанное, ознакомьтесь с их значениями:

*a* — ампер,

*v* — вольт,

*ва* — вольт-ампер,

*вт* — ватт,

*квт* — киловатт,

*гс* — гаусс,

*мкс* — максвелл,

*a/мм<sup>2</sup>* — ампер на квадратный миллиметр,

*г, Г* — грамм,

*кг, кГ* — килограмм,

*сек* — секунда,

э. д. с. — электродвижущая сила,

к. п. д. — коэффициент полезного действия,

*a-v* — ампер-витки,

*об/мин* — оборотов в минуту,

*пер/сек* — периодов в секунду.

*мк* — микрон (0,001 мм),

н. с. — намагничивающая сила,

м. д. с. — магнитодвижущая сила.

Ваши замечания о книжке шлите по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, д. 10, Госэнергоиздат.

*Автор*

---

---

Г Л А В А П Е Р В А Я

**ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ**

При выполнении различных производственных процессов необходимо соблюдать предосторожность, чтобы не получить повреждения и не принести вред окружающим людям и оборудованию. Правила предосторожности объединяются под общим названием техники безопасности. В различных производствах эти правила имеют свои особенности.

В Советском Союзе обращается большое внимание на то, чтобы работа во всех отраслях производства была безопасна, чтобы на производстве не было несчастных случаев. Для этого все поступающие на производство проходят инструктаж по технике безопасности, и, только усвоив правила техники безопасности, допускаются к работе. Станки и другие виды оборудования должны иметь устройства, гарантирующие от несчастных случаев.

Но и в домашних условиях или в школе при некоторых операциях моделирования можно причинить себе повреждения или вызвать пожар. Поэтому к требованиям техники безопасности надо привыкать с первых же шагов трудовой деятельности и хорошо знать основные правила безопасной работы при выполнении производственных процессов изготовления самодельных электродвигателей.

Правила техники безопасности можно разделить на три группы: общие правила техники безопасности, правила безопасности при работе с электротехническими установками и правила пожарной безопасности.

**1-1. Общие правила техники безопасности**

Работайте всегда только вполне исправными инструментами. Молоток должен быть насажен на прочную ручку, туго на ней заклинен, и при работе не соскакивать, а боек молотка быть слегка выпуклым и неперекошенным.

Конец отвертки должен быть тупым, чтобы она не соскакивала с винта и не могла порезать пальцы. Гаечный ключ должен плотно охватывать головку болта, так как при соскакивании ключ легко может повредить руку. Напильники должны быть плотно насажены на деревянные рукоятки.

Не кладите на край стола или верстака тяжелые предметы, чтобы по неосторожности не столкнуть их себе на ноги.

При рубке зубилом следите за тем, чтобы отлетающие стружки не могли поранить окружающих.

При пайке остерегайтесь ожогов паяльником и раскаленными металлами. Защищайте ноги толстым фартуком от каиель припоа.

Особенно берегите глаза, не трите их грязными руками во время работы, не наклоняйтесь слишком близко к обрабатываемым деталям в процессе работы. После работы с кислотами и едкими щелочами немедленно вымойте руки.

При работе на станках остерегайтесь вращающихся частей патрона: они могут захватить края одежды и волосы. Поэтому рукава надо завязывать тесемкой, а голову повязывать платком или надевать головной убор.

Не прикасайтесь пальцами к вращающимся частям. Когда вы почувствуете боль, будет уже поздно — верхний покров кожи будет стерт.

При запечке сердечников ротора и статора остерегайтесь касаться руками нагретых предметов; пользуйтесь толстыми рукавицами.

При намотке обмоток во избежание повреждения кожи не пропускайте проволоку между голыми пальцами, а оберните ее куском суконки.

При строгании ножом рука не должна быть расположена в зоне работы ножа, следите за тем, чтобы не порезать руку, в которой держите предмет.

При резке листовой стали ножницами остерегайтесь порезать пальцы.

При прокалывании шилом листовых материалов остерегайтесь проколоть руку концом шила.

## **1-2. Правила безопасности при работе с электротехническими установками**

Электричество работает в той или иной форме во всех отраслях народного хозяйства. Электрическая энергия имеет огромные преимущества перед другими видами



энергии. Но работа на электротехнических установках требует соблюдения известных мер предосторожности, нарушение которых может привести к тяжелым последствиям и даже смерти. Об этом напоминают нам предостерегающие надписи на электротехнических установках «Высокое напряжение, опасно для жизни».

Опасность заключается в прикосновении к электрической сети, находящейся под напряжением, так как при этом электрический ток протекает через организм человека и вызывает нарушения центральной нервной системы. Электрический ток  $0,02$  *a* вызывает конвульсивное сжатие мышц, человек уже не в состоянии оторвать руку от провода, за который он схватился. При токе же  $0,05$  *a* наступает паралич дыхания и смерть. Сила тока по закону Ома зависит от напряжения сети и от сопротивления организма человека. Наибольшее сопротивление представляет верхний слой кожи. При увлажнении кожи потом или водой сопротивление ее резко понижается. Вот почему особенно опасно касаться частей электротехнических установок мокрыми руками.

Считают, что сопротивление человеческого тела в среднем составляет  $1\ 000$  *ом*, поэтому напряжение  $12$  *v*, при котором ток по закону Ома не может превышать  $0,012$  *a*, считается безопасным.

Электротехника учит, что для прохождения электрического тока необходимы напряжение и замкнутая цепь. Когда человек коснулся двух оголенных проводов (рис. 1-1), через его тело протекает ток. Но электрический ток будет протекать через тело человека и при касании одного провода. Как же здесь образуется замкнутая цепь? Не исключена возможность, что где-то в другом месте второй провод электрической сети соединен с землей, образуя через землю и тело человека замкнутую цепь (рис. 1-2). Вот почему при смене лампочки в патроне нельзя прикасаться к металлическим частям патрона даже если цепь разорвана выключателем. Ведь выключатель дает разрыв только в одном проводе и вы подвергаетесь опасности однополюсного касания к осветительной сети. Опасность увеличивается, если вы стоите на мокром полу или касаетесь второй рукой металлических предметов, например перил лестницы или батареи центрального отопления. Избежать опасности при однополюсном касании можно только при надежной изоляции от земли, для чего пользуются резиновыми ковриками или резиновыми гало-

шами, предварительно проверенными, ибо даже небольшой прокол в галоше, пропускающий воду, нарушает защитное действие изоляции.

Коснуться одного полюса можно иногда совершенно неожиданно, несмотря на соблюдение правил предосторожности, например вследствие неисправности утюга, спираль которого внутри соединена с корпусом. После включения вилки в штепсельную розетку вы прикоснулись

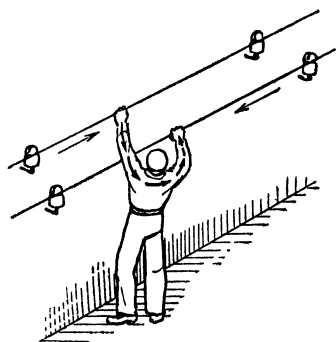


Рис. 1-1. Поражение человека током.

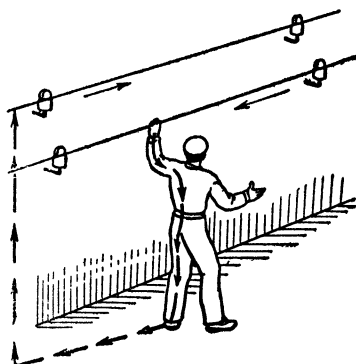


Рис. 1-2. Однополюсное касание проводки.

к корпусу утюга и попали под напряжение сети. В заводских условиях корпуса всех электрических установок соединяются с землей специальным проводом. Тогда при соединении обмотки с корпусом электрический ток пойдет по этому проводу с малым сопротивлением, и человек, прикоснувшийся к корпусу, будет защищен от прохождения тока. В домашних условиях делать заземление всех нагревательных и осветительных приборов неудобно. Поэтому надо внимательно следить за исправностью приборов. Если при касании рукой корпуса прибора ощущается характерное подергивание в руке, т. е., как говорят, прибор «бьет на корпус», надо его немедленно отремонтировать.

Самым надежным способом защиты от поражения электрическим током является пониженное напряжение. Вот почему электродвигатели для подвижных моделей строятся на напряжение не выше 12 в и питаются от источника постоянного тока или от сети через понижающий трансформатор.

Но при этом необходимо помнить, что безопасное на-

пряжение получается только на зажимах вторичной обмотки трансформатора, поэтому соединение их с двигателем может быть выполнено любыми изолированными проводниками, а воздушная сеть для троллейбуса может быть выполнена голыми проводниками, защищенными от прикосновения друг к другу. Что же касается подводки тока к первичной обмотке трансформатора, то она должна быть выполнена с соблюдением всех правил, применяемых при проводке осветительной сети. Эти правила заключаются в следующем:

Для включения трансформатора в сеть на стене должна быть смонтирована штепсельная розетка с плавким предохранителем, защищающим сеть при коротких замыканиях в трансформаторе. Соединение трансформатора с розеткой должно быть выполнено гибким шнуром типа ШР в резиновой изоляции, который применяется для включения настольных ламп, утюгов и других приборов. Конец шнура должен быть соединен с вилкой. Заделка концов шнура с обмоткой трансформатора должна быть надежной, чтобы не произошло обрыва и замыканий (подробнее см. § 8-5). Трансформатор нельзя оставлять включенным в сеть по окончании работы. Нельзя поднимать его за шнур. Не позволяйте маленьким детям включать трансформатор в сеть. Уходя, прячьте трансформатор в недоступное для детей место. Надо защищать розетку от прикосновения к ней маленьких детей при помощи вставленной вилки, которую можно привязать бечевкой или завязать розетку лентой с проложенным кружочком из фанеры. Это необходимо потому, что ребенок может всунуть в гнездо розетки проволоку или шпильку.

Трансформатор после изготовления должен быть проверен на отсутствие замыканий между первичной и вторичной обмотками. Способ проверки изложен в § 8-6. Ни в коем случае не включайте в розетку проводники от вторичной обмотки трансформатора, так как это вызовет короткое замыкание в сети, а трансформатор будет испорчен. Нельзя включать вилку трансформатора в сеть постоянного тока, который вырабатывается некоторыми местными электростанциями. Это также повлечет за собой короткое замыкание в сети и порчу обмоток трансформатора.

Однако и в цепи низкого напряжения трансформатора надо соблюдать некоторые правила. Например, нельзя допускать длительного замыкания проводников, соединенных

с зажимами вторичной обмотки. Это вызовет сильный нагрев обмоток и обугливание изоляции. Для проверки батарейки от карманного фонаря часто прикасаются ее контактными пластинками к языку. Наличие тока проявляется в пощипывании языка. Но нельзя брать в рот выводы от вторичной обмотки трансформатора. Его напряжение в 3 раза больше, чем у батарейки, а мощность в десятки раз больше. Поэтому язык будет сильно обожжен, а если трансформатор неисправен, и обмотки имеют замыкание, то такой опыт может вызвать тяжелые повреждения.

### 1-3. Правила пожарной безопасности

Известно, каким стихийным бедствием являются пожары. Борьба с ними заключается не только в том, чтобы тушить, но и в том, чтобы предупредить их. Общие правила пожарной безопасности широко освещаются и в плакатах, и в кино, и по радио, и по телевизору. Поэтому здесь будут изложены только правила пожарной безопасности, связанные с изготовлением электродвигателей.

Всякая электрическая сеть, если она неправильно используется, таит в себе опасность пожара. Пожар начинается с загорания изоляции проводов, которое происходит по всей длине проводки, поэтому пожар быстро распространяется, особенно в деревянных зданиях. При прохождении тока по проводникам они нагреваются, а это тепло передается изоляции проводников. Чтобы проводники не сильно нагревались, нагрузка их током (плотность тока) не должна превышать определенной величины. Медный провод сечением  $1 \text{ мм}^2$  допускает ток  $6 \text{ а}$ , провод сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  —  $10 \text{ а}$ , провод сечением  $2,5 \text{ мм}^2$  —  $15 \text{ а}$ .

Перегрузка проводов может получиться при одновременном включении большого числа ламп или нескольких нагревательных приборов. В результате сильного нагрева изоляция проводов становится хрупкой и легко разрушается. Тогда может произойти соединение двух соседних проводов, которое называется коротким замыканием. При коротком замыкании ток в цепи возрастает в несколько раз, провода начинают плавиться, а изоляция их загорается. Надежной защитой против загорания проводки при коротких замыканиях являются плавкие вставки в виде тонких проволочек, которые находятся в так называемых пробках. Они установлены в каждой квартире около ввода проводки. Но иногда плавкие вставки заменяют самодельными

пучками медной проволоки (так называемыми «жучками»). Такой «жучок» может выдерживать очень большой ток. Поэтому при коротких замыканиях он не защищает сеть и начинается пожар. Ни в коем случае нельзя заменять плавкие вставки «жучками».

Но пожар может возникнуть и не только при коротком замыкании. Вы включили электрический паяльник, чтобы спаять стержни ротора, а потом ушли и забыли о нем. Паяльник лежал на столе. От него загорелась скатерть, а затем стол и начался пожар. Уходя из дома, никогда не оставляйте включенными электрические приборы.

При запекании статора и ротора (см. § 6-6) не забывайте про зажженную духовку. Если обжигаете листовую сталь в печи, соблюдайте осторожность, чтобы не уронить горячей щепки или раскаленного угля.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 2-1. Проводник в магнитном поле

Поместим проводник в магнитном поле подковообразного магнита перпендикулярно к направлению поля (рис. 2-1). Если через проводник будет протекать ток от батарейки, то на него будет действовать сила  $F$ , которая стремится вытолкнуть проводник из магнитного поля. На этом основан принцип действия всех электродвигателей. Направление силы определяется по правилу левой руки. Если расположить ладонь левой руки так, чтобы магнитное поле входило в ладонь, а четыре вытянутых пальца направить вдоль проводника с током, то отогнутый большой палец укажет направление силы. Сила пропорциональна произведению магнитной индукции  $B$ , длине проводника  $l$  и току  $I$ . Если выразить магнитную индукцию в гауссах, длину проводника в сантиметрах и ток в амперах, то значение силы в килограммах можно определить по формуле

$$F = 1,02 \cdot 10^{-7} B l I \text{ [кг]}. \quad (2-1)$$

Магнитная индукция постоянного магнита составляет около 3 000 *гс*, а батарейка карманного фонаря дает ток 0,3 *а*. Если взять проводник длиной 3 *см*, то значение силы  $F$  будет:

$$F = 1,02 \cdot 10^{-7} \cdot 3\,000 \cdot 3 \cdot 0,3 = 0,00028 \text{ кг} = 0,28 \text{ Г}.$$

Как видно из формулы, сила, действующая на проводник, очень мала. Поэтому обмотки электродвигателей состоят из большого числа проводников.

На рис. 2-2 показаны два проводника 1 и 2 в магнитном поле, образующие один виток обмотки. Ток к концам витка подводится через кольца, по которым скользят медные пластинки, называемые щетками. Проводники соедине-

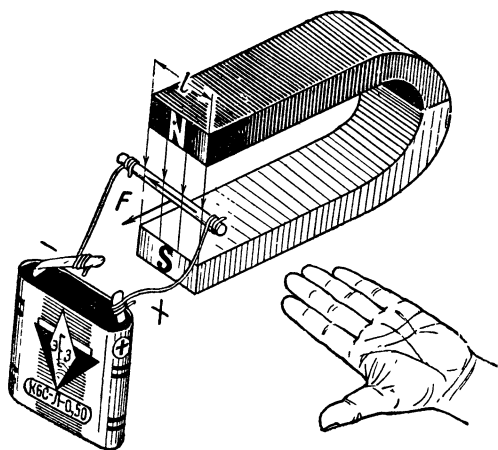


Рис. 2-1. Проводник в магнитном поле.

ны с батарейкой и между собой так, что в проводнике 1 ток течет от нас, а в проводнике 2 — к нам. Пользуясь правилом левой руки, определим направления сил  $F$ , действующих на проводники. Как видно на рисунке, эти силы параллельны и направлены в противоположные стороны. Такая система сил в механике называется парой сил. Пара сил создает момент, который будет поворачивать виток в магнитном поле против вращения стрелок часов.

Численное значение момента можно подсчитать, умножив силу на плечо, т. е. на расстояние между силами. Плечо  $b$  равно ширине витка. Если магнитная индукция, длина проводника и ток сохранили прежние значения, а ширина витка  $b$  равна 2,2 см, то момент пары сил будет равен:

$$M = Fb = 0,00028 \cdot 2,2 = 0,0006 \text{ кг см, или } 0,6 \text{ Гсм. (2-2)}$$

Казалось бы, что виток будет непрерывно вращаться в магнитном поле, т. е. что мы уже получили простейшую модель электродвигателя. Но в действительности это не так. Рассмотрим этот же виток, повернутый на пол-оборота (рис. 2-3). Направление тока в проводниках *1* и *2* оста-

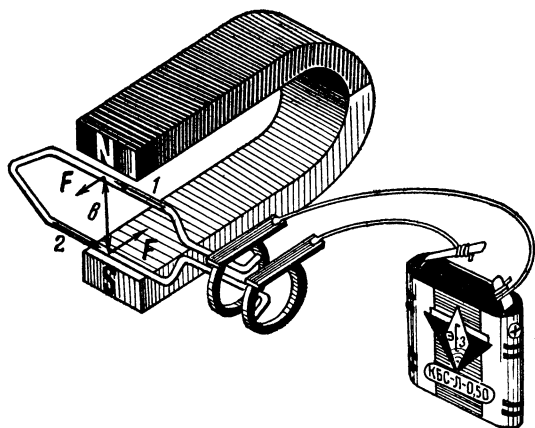


Рис. 2-2. Виток в магнитном поле.

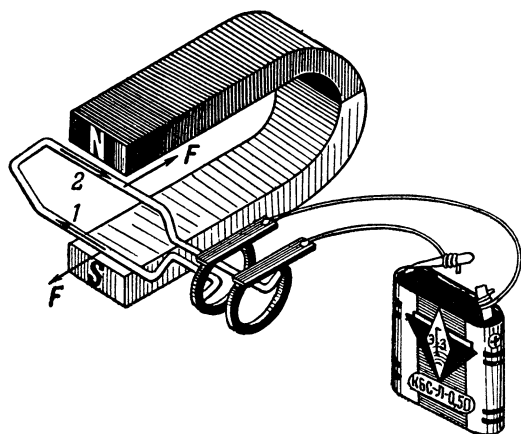


Рис. 2-3. Виток в магнитном поле.

лось прежним, но теперь проводник *1* находится против южного полюса, а проводник *2* — против северного полюса магнита. Пользуясь правилом левой руки, определим направления сил  $F$  и увидим, что они изменились на об-

ратные. Теперь момент пары сил будет поворачивать виток по направлению вращения стрелок часов. Таким образом, виток из положения, показанного на рис. 2-2 или 2-3, повернется на четверть оборота и остановится.

## 2-2. Назначение коллектора

Как же построить модель двигателя постоянного тока. Очевидно, надо после поворота витка на пол-оборота изменить направление тока в проводниках. Вспомним из физики устройство генератора постоянного тока. Там изменение направления тока производилось при помощи коллектора. Очевидно, коллектор необходим и в двигателе.

Соединим концы витка с двумя изолированными друг от друга полукольцами (рис. 2-4). Вот теперь в любом по-

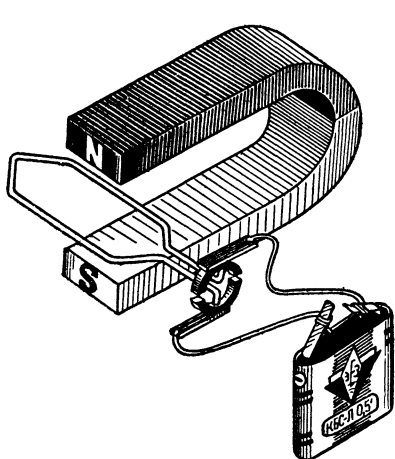


Рис. 2-4. Виток с коллекторными пластинами.

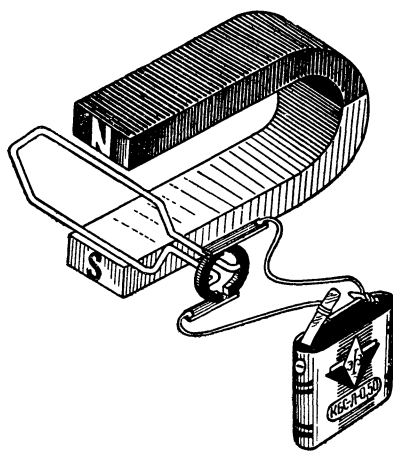


Рис. 2-5. Положение витка в мертвой точке.

ложении витка момент пары сил будет поворачивать его в одном и том же направлении, и виток начнет вращаться. Правда, у этого витка есть одно положение (мертвая точка), из которого он не может стронуться с места. Это когда щетки стоят на стыках двух полуколец (рис. 2-5). Тогда цепь от батарейки будет замыкаться через щетки и полукольца, а в проводники обмотки пойдет небольшая часть тока, так как они имеют большее сопротивление. Поэтому даже самые маленькие двигатели имеют не менее трех пластин коллектора.



Сравнивая назначение коллектора в генераторах и в двигателях постоянного тока, приходим к интересному выводу. Проводники обмотки якоря генератора постоянного тока при вращении якоря пробегают то под северным, то под южным полюсом. Поэтому в них по закону правой руки наводятся переменные э. д. с. и протекает переменный ток. Посредством коллектора он выпрямляется, во внешнюю цепь течет выпрямленный постоянный ток.

Наоборот, к щеткам двигателя подводится от источника постоянный ток. Но для работы двигателя его необходимо преобразовать в переменный ток. Эту роль выполняет коллектор.

Таким образом, в обмотках якоря всех машин постоянного тока протекает переменный ток. Машинами постоянного тока они называются только потому, что генераторы отдают во внешнюю цепь постоянный ток, а двигатели питаются постоянным током.

### 2-3. Устройство двигателей постоянного тока

На рис. 2-6 показано схематическое устройство двигателя постоянного тока. Магнитный поток двигателя создается не постоянным магнитом, а электромагнитами.

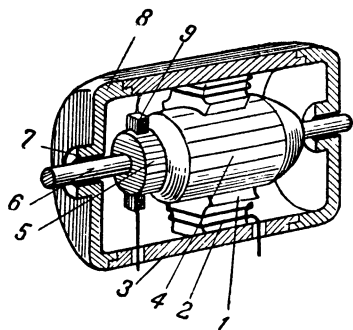


Рис. 2-6. Устройство двигателя постоянного тока.

1 — сердечник электромагнита; 2 — спираль из медной проволоки; 3 — корпус двигателя; 4 — якорь; 5 — коллектор; 6 — вал; 7 — втулки подшипников; 8 — крышка двигателя; 9 — щетка.

Электромагнит представляет собой сердечник 1 из мягкой стали с надетой на него спиралью 2 из медной проволоки. Эти спирали носят название обмоток возбуждения. Электромагниты в электрических машинах называются полюсами. Различная полярность полюсов создается за счет того, что по обмотке одного полюса ток протекает по часовой стрелке, а по другой — против часовой стрелки. Число полюсов зависит от мощности двигателя. Двигатели мощностью до 50 вт выполняются всегда с двумя полюсами.

Обмотки полюсов питаются током от того же источника, что и якорь. Сила электромагнита зависит от числа витков и тока, протекающего через его обмотку. Обмотки

возбуждений могут быть соединены с якорем параллельно (рис. 2-7,а) или последовательно (рис. 2-7,б). В зависимости от способа соединения различают двигатели с параллельным возбуждением или шунтовые (от английского слова *shunt*) и двигатели с последовательным возбуждением или серийные (от английского слова *series*). У двигателей с параллельным возбуждением обмотки полюсов состоят из большого числа витков тонкой проволоки. Поэтому они имеют большое сопротивление и в них ответ-

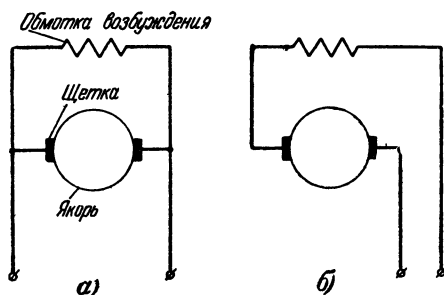


Рис. 2-7. Схемы двигателей.  
а — с параллельным, б — с последовательным возбуждением.

вляется незначительная часть тока, поступающего в двигатель от источника. В двигателях с последовательным возбуждением через обмотки возбуждения протекает весь ток якоря, и потому они намотаны из толстой проволоки, но имеют мало витков. Двигатели малой мощности изготавливаются почти исключительно с последовательным возбуждением.

Полюса привинчены к трубе 3 (рис. 2-6) из мягкой стали, которая имеет во много раз большую магнитную проницаемость, чем воздух. Это позволяет создать большую магнитную индукцию при помощи небольших обмоток возбуждения. Передняя стенка трубы отрезана, чтобы можно было видеть внутреннее устройство двигателя. Труба, к которой прикрепляются полюса, называется корпусом или станиной.

Якорь 4 собран из тонких листов мягкой стали, в которых сделаны канавки (пазы) для проводников обмотки. Концы проводников обмотки якоря присоединены к пластинкам коллектора 5. Якорь и коллектор надеты на вал 6, представляющий собой стальной пруток. На концы

вала надеты подшипники 7 из латуни или бронзы. Подшипники закреплены в крышках 8, крепящихся винтами к корпусу двигателя. Между полюсами и якорем остаются узкие щели — воздушные зазоры. На коллекторе установлены две щетки 9, которые вставлены в коробочки и прижимаются к коллектору пружинками. Щетки в виде медных полосок, показанные на рис. 2-4, применяются только в игрушечных двигателях. Щетка, показанная на рис. 2-6, представляет собой кубик, спрессованный из угольных и графитовых порошков. Такие щетки меньше искрят и лучше сохраняют коллектор при работе двигателя. Коробочки с пружинками называются щеткодержателями. Они прикрепляются к крышке, но изолированы от нее картонными прокладками.

#### 2-4. Как работает электродвигатель

Чтобы двигатель работал, надо соединить его обмотки с источником постоянного тока. Для самых маленьких двигателей, потребляющих ток не более 0,3 а., можно в качестве источника тока применить батарейку от карманного фонаря. Более мощные двигатели можно питать постоянным током от радиобатареи или аккумулятора.

Как только мы соединим обмотки двигателя с источником тока, якорь начнет вращаться. Это происходит потому, что на витки обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле, действуют моменты пар сил, которые складываются и образуют вращающий момент, заставляющий якорь вращаться.

Вращающий момент двигателя можно рассчитать. Он зависит от мощности двигателя и скорости его вращения и определяется по формуле

$$M_{вр} = 97,5 \frac{P}{n} \text{ [кГ} \cdot \text{см]}. \quad (2-3)$$

В этой формуле  $P$  обозначает мощность двигателя в ваттах, а  $n$  — скорость вращения якоря, выраженную в оборотах в минуту.

Например, двигатель мощностью 5 вт, работающий при скорости вращения 3 000 об/мин, будет иметь вращающий момент

$$M_{вр} = 97,5 \frac{5}{3000} = 0,162 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Если сравнить этот момент с моментом, создаваемым одним витком, который был вычислен по формуле (2-2), то оказывается, что вращающий момент двигателя в 270 раз больше момента одного витка. Это потому, что обмотка якоря состоит из нескольких сотен витков и вращается в более сильном магнитном поле электромагнитов.

Формулу (2-3) можно выразить и иначе:

$$P = 1,02 M_{\text{оп}} n \text{ [вт]}. \quad (2-4)$$

Из этого выражения видно, что при одной и той же величине вращающего момента мощность двигателя будет увеличиваться пропорционально скорости вращения. Как будет показано в гл. 5, двигатель с большой скоростью вращения будет иметь меньшие размеры и вес, чем тихоходный двигатель такой же мощности. Поэтому двигатели малой мощности выполняются с большими скоростями вращения — до 10 000 об/мин.

Как только якорь начал вращаться, в проводниках его обмотки будут наводиться э.д.с. По закону Ленца они направлены против напряжения источника тока. Поэтому силу тока, потребляемую якорем электродвигателя, можно узнать, разделив разность между напряжением  $U$  и э.д.с.  $E$  на сопротивление обмотки двигателя  $R$ :

$$I = \frac{U - E}{R}. \quad (2-5)$$

Пока к валу двигателя не приложено никакой нагрузки, он работает на холостом ходу. Чем быстрее вращается якорь двигателя, тем большая э.д.с. будет наводиться в его обмотке. При холостом ходе двигатель имеет наибольшую скорость вращения, и поэтому ток, потребляемый двигателем при холостом ходе, мал. Но якорь никогда не может развить такую скорость вращения, чтобы э.д.с.  $E$  сравнялась с приложенным напряжением  $U$ . Как видно из формулы (2-5), при этом числитель превратился бы в нуль, а следовательно, двигатель перестал бы потреблять ток от источника. Из формулы (2-2) видно, что момент двигателя также превратился бы в нуль, и двигатель перестал бы работать.

Нагрузка двигателя состоит из сопротивления тех механизмов, которые он приводит во вращение. Когда хотят изучить свойства двигателя, то нагрузку ему создают при помощи тормоза (рис. 2-8). Для этого против шкива 1 на конце вала двигателя устанавливают стойку 2, с которой

шарнирно соединен рычаг 3. К рычагу прикреплена колодка 4, прилегающая к шкиву двигателя. На другом конце рычага подвешен стержень 5 из проволоки, на который можно надевать грузики 6. Чем больше грузиков надето на стержень, тем сильнее колодка будет давить на шкив. При этом увеличится сила трения на окружности шкива. Произведение силы трения  $T$  на радиус шкива  $r$  будет создавать тормозной момент для двигателя. При установившейся скорости вращения тормозной момент равен вращающему моменту двигателя.

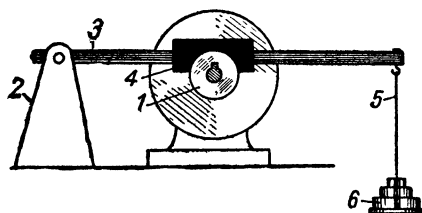


Рис. 2-8. Нагрузка двигателя тормозом.  
1 — шкив; 2 — стойка; 3 — рычаг; 4 — колодка;  
5 — стержень; 6 — груз.

По мере увеличения нагрузки будет увеличиваться ток, потребляемый двигателем от источника, а скорость вращения якоря будет снижаться.

Если мы будем увеличивать число грузиков, то якорь двигателя, наконец, остановится. Такое состояние двигателя, когда он приключен к источнику тока, и якорь не вращается, называется коротким замыканием двигателя. Очевидно, что при коротком замыкании двигатель будет потреблять очень большой ток, так как при неподвижном якоре  $E=0$ , а следовательно, по формуле (2-5)

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2-6)$$

Сопrotивление обмоток двигателя мало, и поэтому ток короткого замыкания в несколько раз превышает нормальный рабочий ток двигателя. При этом ухудшаются условия охлаждения, так как неподвижный якорь не обдувается воздухом. Поэтому при коротком замыкании двигатель очень быстро нагреется, и его обмотки будут повреждены вследствие обугливания изоляции проводников.

Рассмотрим момент пуска двигателя. В момент приключения его обмоток к источнику тока якорь еще непо-

движен. Поэтому пусковой ток можно определить по формуле (2-6), как и ток короткого замыкания. Но по мере увеличения скорости будет нарастать э. д. с., и ток будет быстро спадать. Однако для двигателей мощностью выше 1 кВт пусковой ток является опасным, и поэтому при пуске двигателя последовательно с якорем включают дополнительное пусковое сопротивление. Двигатели мощностью в десятки ватт можно пускать, непосредственно приключая их к источнику питания без пусковых сопротивлений.

## 2-5. Характеристики двигателей

При изменении нагрузки двигателя изменяется мощность, вращающий момент, потребляемый ток и скорость вращения двигателя. Изменение этих величин можно было бы показать при помощи цифровых таблиц. Но гораздо нагляднее пользоваться графическими изображениями изменяющихся величин. Эти графики называются характеристиками двигателя. Наиболее важной является механическая характеристика, которая показывает, как изменяется скорость вращения двигателя в зависимости от развиваемого вращающего момента.

Для построения характеристики надо провести две взаимно перпендикулярные прямые, которые называются осями координат (рис. 2-9). Точка *O* пересечения осей называется началом координат. По горизонтальной оси откладывают значения вращающего момента, а по вертикальной — скорости вращения ротора.

Возьмем двигатель с параллельным возбуждением мощностью 30 *вт* при скорости вращения 2900 *об/мин*.

Вращающий момент двигателя по формуле (2-3)

$$M_{вр} = 97,5 \frac{30}{2900} = 1 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

Масштабы для моментов и скоростей вращения можно выбирать произвольно. Возьмем масштаб по горизонтальной оси в 1 *см* — 0,4 *кг·см*, а по вертикальной в 1 *см* — 1000 *об/мин*. Из точек на осях, соответствующих вращающему моменту 1 *кг·см* и скорости вращения 2900 *об/мин*, проведем пунктирные линии, параллельные осям координат. Пересечение их будет одной из точек механической характеристики двигателя. Остальные точки механической характеристики можно получить расчетным или опытным путем. В первом случае в расчетные фор-

мулы подставляют значения вращающего момента и получают соответствующие этим моментам скорости вращения. При получении характеристик опытным путем нагружают двигатель различными вращающими моментами при помощи тормоза и измеряют скорости вращения специальными приборами.

На рис. 2-9 точки характеристики обозначены кружочками. Если соединить эти кружочки линией, то полу-

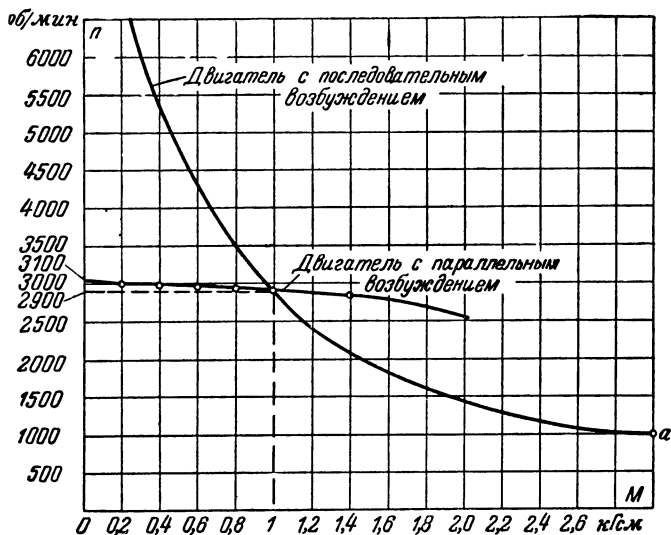


Рис. 2-9. Механические характеристики двигателя с параллельным и последовательным возбуждением.

чим механическую характеристику. Точка характеристики, отложенная по вертикальной оси, для которой скорость вращения равна 3100 об/мин, а приложенный к валу двигателя вращающий момент равен нулю, является точкой холостого хода.

Механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением имеет вид прямой линии с небольшим наклоном от холостого хода в сторону полной нагрузки. Это значит, что при изменениях нагрузки скорость вращения якоря остается почти постоянной. Небольшое уменьшение скорости происходит за счет того, что при увеличении нагрузки, а следовательно, и потребляемого тока увеличивается падение напряжения в обмотках двигателя.

Однако такой вид механической характеристики не означает, что нельзя регулировать скорость вращения двигателя с параллельным возбуждением. Для такой регулировки в цепи обмотки возбуждения имеется реостат, обозначенный на схеме буквами ШР, что значит шунтовой реостат (рис. 2-10). Если надо увеличить скорость вращения, то передвигают движок реостата против часовой стрелки, уменьшая ток возбуждения, а следовательно, и магнитное поле полюсов. Стремясь развить прежнюю э. д. с., якорь начинает вращаться быстрее. Если надо снизить скорость вращения, то движок реостата передвигают по часовой стрелке.

Такой способ регулирования является очень экономичным. Ведь ток в обмотке возбуждения шунтового двигателя составляет лишь незначительную часть от потребляемого двигателем тока. Значит, в шунтовом реостате будут небольшие потери энергии.

Теперь посмотрим, какой вид будет иметь механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением. При изменении тока в якоре одновременно будет изменяться и магнитное поле, так как через обмотку возбуждения протекает весь ток якоря. Как было видно из формул (2-1) и (2-2), вращающий момент пропорционален магнитной индукции и току якоря. Для двигателя с последовательным возбуждением можно сказать, что вращающий момент пропорционален квадрату тока. Следовательно, механическая характеристика будет изображаться не прямой, а кривой.

На рис. 2-9 показана эта характеристика для двигателя такой же мощности и скорости вращения, какой был рассмотрен при параллельном возбуждении. Если сохранить те же масштабы, то точка характеристики при  $M_{вр} = 1 \text{ кг} \cdot \text{см}$  и  $n = 2900 \text{ об/мин}$  будет расположена в том же месте графика, как и на характеристике двигателя с параллельным возбуждением. Но характер изменения скорости при изменении вращающего момента будет совсем иной.

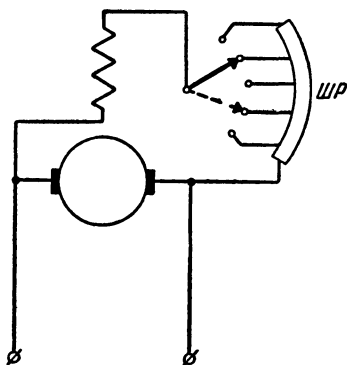


Рис. 2-10. Регулирование скорости вращения шунтовым реостатом.



Как видно из характеристики, при уменьшении вращающего момента скорость вращения якоря двигателя резко возрастает. Это объясняется тем, что с уменьшением нагрузки и потребляемого тока магнитное поле делается очень слабым. Стремясь развить необходимую э. д. с., якорь сильно увеличивает скорость вращения.

При вращении ротора действует центробежная сила, которая стремится вытолкнуть проводники обмотки из пазов, оторвать пластинки коллектора и зубцы якоря. Центробежная сила значительно превосходит вес вращающихся частей. Так, например, на окружности якоря диаметром 5 см, вращающегося со скоростью 6 000 об/мин, на каждый грамм веса действует центробежная сила 10 Г. При увеличении скорости вращения центробежная сила растет квадратично. При скорости вращения 12 000 об/мин центробежная сила увеличится в 4 раза и будет в 40 раз превышать вес вращающихся частей якоря.

Чтобы избежать опасности разрыва якоря, двигатели с последовательным возбуждением мощностью более 100 вт никогда не пускают вхолостую. К валу двигателя должна быть всегда приложена механическая нагрузка. Серийные двигатели мощностью в десятки ватт можно пускать и без нагрузки. Это объясняется тем, что вращающий момент таких двигателей невелик, и при увеличении скорости вращения якорь будет затормаживаться за счет потерь холостого хода. Эти потери быстро растут с увеличением скорости вращения.

Вторая отличительная особенность двигателя с последовательным возбуждением заключается в том, что он может развить вращающий момент, значительно превышающий момент при его нормальной нагрузке. Это свойство двигателя называется перегрузочной способностью. Точка *a* механической характеристики показывает, что при уменьшении скорости вращения до 1 000 об/мин вращающий момент в 3 раза превышает номинальный вращающий момент. Это происходит за счет того, что с увеличением потребляемого тока усиливается и магнитное поле. Наибольший момент двигатель развивает при пуске. Этот момент называется пусковым моментом двигателя.

## 2-6. Применение двигателей постоянного тока

Электродвигатели с параллельным и последовательным возбуждением имеют разные области применения. Например, на токарный станок ставят двигатель с параллель-

ным возбуждением. Станок пускается в ход вхолостую, и поэтому от двигателя не требуется большого пускового момента. Резец подводят к обрабатываемой детали, когда станок уже вращается. Разные рабочие скорости станка можно получать, регулируя скорость вращения двигателя шунтовым реостатом.

Двигатели с последовательным возбуждением широко распространены в электрическом транспорте (трамвай, метро, троллейбус, пригородные электрические железные дороги, электровозы), а также в подъемных устройствах (электрические подъемные краны). В этих установках необходим большой пусковой момент двигателя, так как наибольшее усилие затрачивается на трогание с места. Каждому, вероятно, приходилось видеть, с каким трудом паровоз трогает с места тяжелый поезд. Машинист дает полный пар, а колеса паровоза буксуют, т. е. вращаются на месте. И только после нескольких буксовок поезд медленно трогается с места. Разгон поезда происходит очень медленно, так как ему надо сообщить ускорение, а на это затрачивается большая сила. Электровоз же легко трогает состав с места и быстро набирает скорость. Это происходит потому, что двигатели с последовательным возбуждением электровоза развивают большой вращающий момент при пуске.

Если бы на трамвае установить двигатели с параллельным возбуждением, то пассажирам пришлось бы после каждой остановки подталкивать вагон, чтобы помочь ему стронуться с места, а двигатели с последовательным возбуждением легко страгивают вагон с места и быстро разгоняют его. Опасность чрезмерного увеличения скорости вращения трамвайного двигателя с последовательным возбуждением отсутствует, так как даже если все пассажиры выйдут, двигатель будет под нагрузкой, которая состоит из усилия для передвижения пустого вагона.

Посмотрим, как влияет характеристика двигателя с последовательным возбуждением на движение трамвая. При движении по горизонтальному участку от двигателя требуется небольшой вращающий момент, которому соответствует большая скорость вращения. Но вот вагон пошел в гору. От двигателя потребовался больший вращающий момент и он перешел в другую точку характеристики с меньшей скоростью вращения. Как только подъем кончился, двигатель снова увеличит скорость вращения, и вагон пойдет с прежней скоростью.

Все это происходит без всяких переключений рукоятки контроллера, которым вожатый управляет двигателем. Поэтому говорят, что двигатель с последовательным возбуждением имеет автоматическую характеристику, т. е. сам приспособляется к изменениям нагрузки.

Микродвигатели постоянного тока изготавливаются почти исключительно с последовательным возбуждением. Они легче пускаются в ход без пусковых сопротивлений и развивают большой пусковой момент. В гл. 4 будет рассказано, как они могут работать на переменном токе. Такие двигатели применяются в пылесосах, для вращения швейных машин, в зубо врачебных кабинетах для вращения бормашин. Для приведения в действие модели подъемного крана или электровоза также необходим двигатель с последовательным возбуждением.

Основное достоинство двигателей постоянного тока — это возможность плавной регулировки скорости в широких пределах, но конструкция их сложна и они требуют постоянного наблюдения за работой щеток и коллектора. Кроме того, двигатели постоянного тока требуют специальных источников питания, так как все электрические станции вырабатывают только переменный ток. Вот почему двигатели постоянного тока применяются только там, где заменить их двигателями переменного тока трудно, и на каждые 50—70 двигателей переменного тока приходится только один двигатель постоянного тока.

## 2-7. Потери энергии в двигателе

Если двигатель потребляет 10 *a* при 120 *v*, то мощность, потребляемая двигателем, будет:

$$P_1 = 10 \cdot 120 = 1\,200 \text{ вт, или } 1,2 \text{ квт.}$$

Однако нельзя сказать, что этот двигатель имеет полезную мощность 1,2 *квт*. Полезная мощность двигателя, измеряемая на шкиве, на конце вала всегда меньше потребляемой. Разность между потребляемой и полезной мощностью теряется внутри двигателя. Отношение полезной мощности к потребляемой называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.) и обозначается греческой буквой  $\eta$  (эта). Посмотрим, в каких же частях двигателя происходят потери энергии.

Если по проводнику протекает ток, то происходит затрата энергии, и проводник нагревается. По закону

Джоуля — Ленца мощность, теряемая в обмотках двигателя, определяется по формуле

$$P_{\text{м}} = I^2 R \text{ [вт]}. \quad (2-7)$$

Эти потери называются электрическими потерями или потерями в меди двигателя. Как видно из формулы, они пропорциональны квадрату тока и сопротивлению обмотки. Очевидно, что при холостом ходе двигателя эти потери малы и быстро растут при увеличении нагрузки.

При вращении якоря в магнитном поле будут наводиться э. д. с. не только в проводниках обмотки, но и в стальном сердечнике якоря, так как якорь пересекает линии магнитного поля. На рис. 2-11,а показано, что под

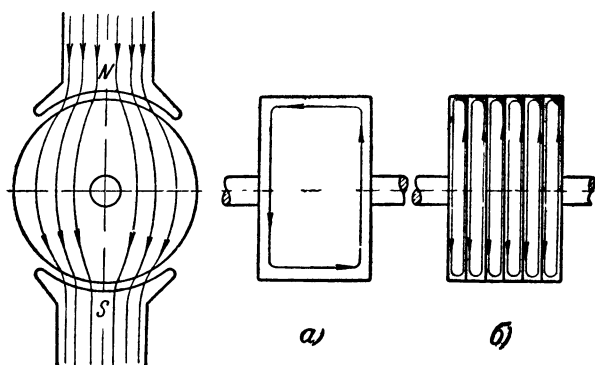


Рис. 2-11. Вихревые токи в якоре.  
а — в массивном якоре; б — в расслоенном якоре.

северным полюсом э. д. с. направлена в одну сторону, а под южным — в другую. Поэтому внутри якоря появятся токи, которые называются вихревыми токами. Ввиду того, что якорь имеет малое сопротивление, вихревые токи могут достигнуть большой величины. Они будут бесполезно нагревать якорь. Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов сердечник якоря собирается из тонких листов, изолированных один от другого слоем лака. На рис. 2-11,б показано, что при разделении длины якоря на тонкие слои вихревые токи значительно снижаются, так как э. д. с. теперь наводятся на коротких участках. Другим средством снижения потерь от вихревых токов является увеличение сопротивления листов, из которых собирается якорь. Для этого в состав стали вводят добавку кремния от 1 до 3%.

Выделим на якоре продольную полосу и проследим ее путь при вращении якоря. Она будет пробегать то под северным, то под южным полюсом и каждый раз будет перемагничиваться. Как известно из физики, при перемагничивании имеют место потери энергии, называемые потерями от гистерезиса. Их можно уменьшить, применяя для якоря мягкую сталь с малым остаточным магнетизмом. Потери от вихревых токов и от гистерезиса называются потерями в стали якоря.

В сердечниках полюсов и в корпусе машины постоянного тока нет вихревых токов и не происходит перемагничивания, так как магнитное поле в неподвижных частях машины постоянного тока не меняется. Поэтому корпус можно сделать не из тонких листов, а из трубы.

При прохождении тока через контакт между щетками и коллектором происходит падение напряжения около 2 в. Если умножить падение напряжения на ток якоря, то получим потери в контакте между щетками и коллектором.

Механические потери затрачиваются на трение в подшипниках, трение щеток о коллектор и трение якоря о воздух. В микродвигателях при большой скорости вращения механические потери могут быть значительными.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК И ЕГО СВОЙСТВА

### 3-1. Получение переменного тока

Переменный ток имеет большие преимущества перед постоянным. Генераторы переменного тока проще по устройству, надежнее в работе и строятся гораздо большей мощности и на большее напряжение, чем генераторы постоянного тока. Но главное преимущество переменного тока состоит в том, что его легко можно преобразовывать из одного напряжения в другое при помощи трансформаторов, которые не имеют вращающихся частей и поэтому проще машин. Для передачи тока на большие расстояния в начале линии его преобразуют в ток высокого напряжения в несколько сотен тысяч вольт, а в конце снова понижают до тысяч и сотен вольт. При одной и той же мощности при повышении напряжения во столько же раз понижается сила тока, что дает возможность передавать большие мощности по относительно тонким проводам с небольшими потерями энергии.

Переменный ток вырабатывается генераторами. Для того чтобы понять принцип устройства генератора переменного тока, поместим изогнутый проводник в равномерном магнитном поле, создаваемом полюсами магнита (рис. 3-1). К концам проводника припаяем кольца, к которым приложим медные пластинки, соединенные с внешней цепью. При вращении проводника вокруг оси  $AB$  он

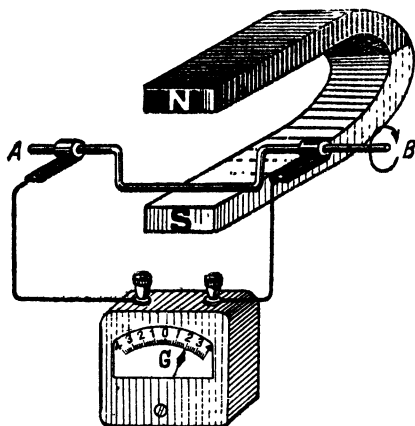


Рис. 3-1. Принцип работы генератора переменного тока.

будет пересекать линии магнитного поля, по закону электромагнитной индукции в нем будет наводиться э. д. с., на концах проводника появится напряжение, а в замкнутой цепи потечет переменный ток. Таким образом, разница между генераторами переменного и постоянного тока заключается в отсутствии коллектора.

Посмотрим, как будут изменяться напряжение и ток за время одного оборота проводника в магнитном поле. На рис. 3-2 показан вращающийся проводник в разных положениях. В положении 1 проводник скользит вдоль магнитных линий, не пересекая их, и э. д. с. в нем равна нулю. В положении 2 проводник начнет пересекать магнитные линии и в цепи появится индуктированный ток. По правилу правой руки он будет направлен от нас, поэтому проводники обозначены крестиками. В положении 3 напряжение и ток еще увеличатся, а в положении 4 достигнут наибольшего значения, так как проводник здесь движется поперек направления магнитного поля. Изме-

нения тока в проводнике будут отмечаться стрелкой гальванометра, которая отклоняется от среднего положения на угол, пропорциональный току в проводнике. При перемещении проводника от положения 4 к положению 7 напряжение и ток будут уменьшаться, а стрелка гальванометра пойдет обратно. В положении 7 стрелка встанет на нуль, что означает отсутствие тока в цепи. В положении 8 в цепи снова появится ток, но по правилу правой руки он будет протекать теперь в обратном направлении, и потому проводники обозначены точками. Стрелка гальванометра будет отклоняться от нуля в другую сторону. Изменения тока при перемещении проводника по нижней половине

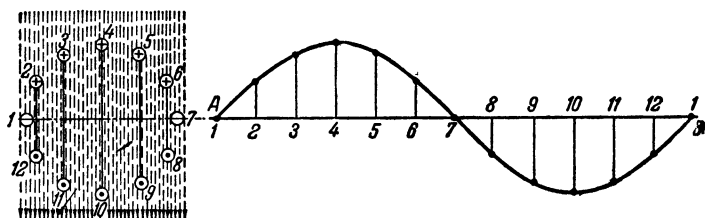


Рис. 3-2. Синусоидальное изменение тока и напряжения.

окружности будут проходить так же, как и при перемещении его по верхней половине, только ток в проводнике будет направлен в обратную сторону.

Изменения тока и напряжения можно наглядно изобразить в виде графика. Для этого отложим на продолжении горизонтального диаметра (рис. 3-2) отрезок  $AB$  произвольной длины и разделим его на 12 равных частей. Обозначим части отрезка теми же цифрами, какими обозначены положения проводника. В точках отрезка составим перпендикуляры и отложим на них показания гальванометра, причем отклонения стрелки в одну сторону будем откладывать вверх, а отклонения в противоположную сторону — вниз от отрезка  $AB$ . Теперь соединим концы перпендикуляров непрерывной линией.

Показания гальванометра для разных положений проводника пропорциональны расстоянию проводника от горизонтального диаметра. Если провести радиусы, соединяющие различные положения проводника с центром окружности, то легко убедиться, что расстояние проводника от горизонтального диаметра равно линии синуса

угла, образуемого радиусом с горизонтальным диаметром. Таким образом, длины перпендикуляров равны синусам угла между радиусом и горизонтальным диаметром. Поэтому линия, соединяющая концы перпендикуляров, называется синусоидой.

Время, в течение которого ток в проводнике проходит все изменения, называется периодом. При следующих оборотах проводника в магнитном поле все изменения тока и напряжения будут происходить так же, как и в течение первого периода. Число периодов в секунду называется частотой переменного тока. Электрические станции вырабатывают переменный ток частотой в *50 пер/сек.* Следовательно, продолжительность одного периода составляет *1/50 сек.* Чтобы получить частоту 50 периодов, надо проводник, показанный на рис. 3-1, вращать со скоростью *50 об/сек.*, или *3 000 об/мин.*

### 3-2. Действующие значения переменного тока и напряжения

Переменный ток меняет свое направление 2 раза в течение периода, т.е. 100 раз в секунду проходит через нуль. Почему же электрические лампочки у нас в квартирах не мигают. Это объясняется тем, что за время, когда ток близок к нулю, нить лампы еще не успеет потемнеть, как по ней уже потечет ток другого направления и будет снова ее накаливать.

Вот почему лампочки при переменном токе горят ровным светом.

Как можно измерить переменное напряжение и переменный ток приборами? Если бы стрелки приборов следовали за всеми изменениями переменного тока за время периода, то они качались бы так быстро, что мы бы их не видели, как не видим спицы вращающегося велосипедного колеса. Но благодаря инерции стрелки не следуют за изменениями тока и напряжения в течение периода и остаются неподвижными. Конечно, если будет меняться сила тока в цепи, то угол поворота стрелки также изменится. Какой же ток и какое напряжение показывают амперметры и вольтметры переменного тока? Приборы переменного тока показывают так называемое действующее значение тока, тепловое действие которого эквивалентно (равноценно) действию постоянного тока такой же силы. Действующее значение тока и напряжения



в  $\sqrt{2} = 1,4$  раза меньше наибольшего значения. Так, например, если на рис. 3-2 перпендикуляры в точках 4 и 10 будут обозначать ток 0,28 а, то действующее значение переменного тока будет  $\frac{0,28}{1,4} = 0,2$  а.

Некоторые измерительные приборы, например основанные на тепловом эффекте при прохождении тока, годятся как для измерения постоянного, так и переменного тока. Такие приборы имеют на шкале условное обозначение  $\approx$ . Приборы, пригодные только для измерения постоянного тока, имеют знак —, а приборы только для переменного тока имеют знак  $\sim$ .

### 3-3. Самоиндукция

Вокруг проводника, по которому протекает электрический ток, создается магнитное поле. Существование магнитного поля очень наглядно доказывается опытом с железными опилками. Силовые линии магнитного поля гуще вблизи проводника и реже по мере удаления от него. Они имеют определенное направление, о чем можно судить по магнитной стрелке, устанавливающейся по направлению силовой линии и показывающей северным концом направление поля. При изменении направления тока в проводнике стрелка повернется другим концом. Направление силовых линий определяют по правилу буравчика. Если ввинчивать буравчик по направлению тока, то вращение рукоятки укажет направление линий магнитного поля.

Все же один проводник создает слабое поле, даже если по нему пропускать сильный ток. Свернем этот проводник в спираль (рис. 3-3) и будем пропускать по нему постоянный ток. Мысленно разрежем спираль, как показано на рис. 3-3. В верхних проводах ток будет идти от нас, а в нижних — к нам. Вокруг проводников образуются магнитные поля, направленные по правилу буравчика.

В промежутках между проводниками одного ряда силовые линии направлены навстречу друг другу. Поэтому они будут проходить внутри спирали. Но так как силовые линии должны быть обязательно замкнутыми, то, пройдя вдоль спирали и выйдя из нее с одного конца, они обогнут спираль снаружи и возвратятся в нее с другого конца. Таким образом, спираль создает магнитное поле по-

добно полю прямого магнита, а на концах спирали образуются как бы два полюса: северный слева и южный справа.

Магнитное поле спирали значительно сильнее магнитного поля одного проводника при одинаковой силе тока. Магнитное поле можно усилить еще более, если вставить внутрь спирали железный сердечник, обладающий значительно большей магнитной проницаемостью, чем воздух. Благодаря сердечникам электромагниты создают магнитные поля огромной силы при небольшом токе, протекающем через надетые на них спирали.

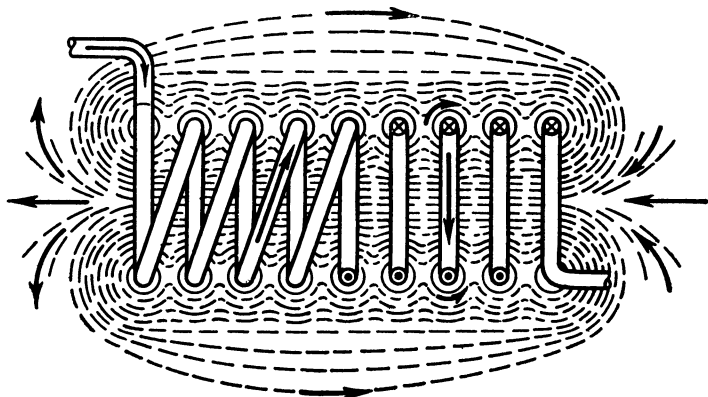


Рис. 3-3. Магнитное поле соленоида.

Если по проводнику протекает постоянный ток, то сопротивление его не изменится от того, что мы свернем проводник в спираль или вставим в спираль железный сердечник.

Если по той же спирали будет протекать переменный ток, то магнитное поле спирали будет также переменным. При изменении силы и направления поля силовые линии его будут пересекать проводники спирали и в них будут наводиться э. д. с. Они наводятся изменением тока в самой спирали, и потому называются э. д. с. самоиндукции. По закону Ленца направление э. д. с. самоиндукции таково, что оно противодействует изменению тока. При уменьшении тока э. д. с. самоиндукции стремится его поддержать и сопротивляется увеличению тока.

### 3-4. Закон Ома для цепи переменного тока

Закон Ома выражает зависимость между током, напряжением и сопротивлением. Для цепи постоянного тока он выражается формулой

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3-1)$$

в которой ток  $I$  выражен в амперах, напряжение  $U$  — в вольтах, а сопротивление  $R$  — в омах.

Этой формулой можно пользоваться и для цепей переменного тока, но только в том случае, когда цепь состоит из одних активных сопротивлений, к которым относятся электрические проводники, лампочки, нагревательные приборы. Но если в цепи есть спирали с большим числом витков или спирали, надетые на железные сердечники, то формула (3-1) для переменного тока неприменима. Спирала с большим числом витков и надетые на железные сердечники, кроме активного сопротивления  $R$ , обладают так называемым индуктивным сопротивлением  $X$ , которое возникает вследствие самоиндукции. Активное и индуктивное сопротивления можно сложить геометрически и тогда получится общее сопротивление спирали  $Z$ :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (3-2)$$

В этой формуле  $R$  — активное сопротивление в омах, а  $X$  — индуктивное сопротивление в омах.

Закон Ома для цепи переменного тока с включенными в нее спиралями выражается следующей формулой:

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (3-3)$$

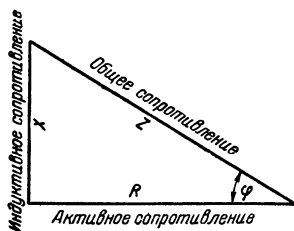


Рис. 3-4. Треугольник сопротивлений.

Общее сопротивление цепи переменного тока можно графически изобразить как гипотенузу прямоугольного треугольника, у которого катетами являются активное и индуктивное сопротивления (рис. 3-4). Угол между общим и активным сопротивлениями, обозначаемый греческой буквой  $\phi$  (фи), имеет очень важное значение в цепях переменного тока. Чем больше индуктивное сопротивление цепи, тем больше угол  $\phi$ .

### 3-5. Мощность переменного тока

По закону Джоуля — Ленца мощность постоянного тока равна:

$$P = UI \text{ [вт]}. \quad (3-4)$$

Но ведь переменный ток и напряжение меняют величину и направление. Как же можно подсчитать мощность переменного тока? Изобразим на одном графике синусоиды тока  $I$  и напряжения  $U$  (рис. 3-5). Для получения кривой, изображающей мощность переменного тока, будем перемножать значения тока и напряжения для различных точек синусоид. В первой половине периода значения тока и напряжения будут положительными, и поэтому произведения их будут также положительными. Будем откладывать их вверх от

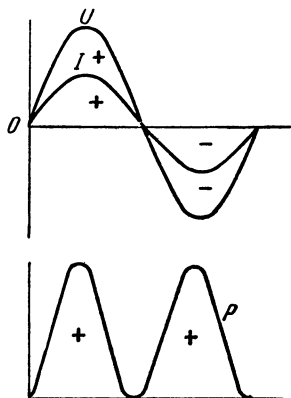


Рис. 3-5. Мощность переменного тока.



Рис. 3-6. Треугольник мощностей.

горизонтальной оси. Во второй половине периода значения тока и напряжения изменят знак на минус. Но так как произведение двух отрицательных величин есть число положительное, то мощность переменного тока за вторую половину периода будет также положительной и изобразится такой же кривой, как и мощность за первую половину периода. Таким образом, мощность остается положительной в течение всего периода. Среднее значение мощности за весь период будет равно произведению действующих значений тока и напряжения. Значит, мощность лампочки не зависит от того, включена ли она в сеть постоянного или переменного тока при одном и том же напряжении. Такое положение справедливо только для цепей без индуктивного сопротивления.

Как же определить мощность обмотки электромагнита? Здесь придется учитывать индуктивное сопротивление.

Умножив все стороны треугольника сопротивлений (рис. 3-4) на  $I^2$ , получим новый треугольник, подобный первому, так называемый треугольник мощностей (рис. 3-6). В нем горизонтальный катет выражает знакомую формулу мощности. Действительно, если в формуле мощности (3-4) подставить вместо напряжения  $U$  его значение из формулы (3-1)  $U=IR$ , то получим:

$$P=I^2R. \quad (3-5)$$

Что же представляют собой две другие стороны треугольника мощностей? Гипотенуза выражает так называемую кажущуюся мощность  $S$ , которая выражается в вольтамперах. Она равна произведению тока на напряжение  $S=UI[ва]$ . Но активная мощность является только составной частью кажущейся мощности. Зная величину кажущейся мощности по показаниям амперметра и вольтметра и значение угла  $\varphi$ , можно определить активную мощность, пользуясь тригонометрией. Активная мощность

$$P=UI \cos \varphi [вт]. \quad (3-6)$$

Этой формулой можно пользоваться для любых цепей переменного тока. Например, если цепь состоит из активных сопротивлений, то  $X=0$ , а следовательно, по рис. 3-4 угол  $\varphi$  также равен нулю. Косинус угла  $\varphi$  будет равен единице и активная мощность

$$P=UI [вт].$$

Таким образом, для цепей, состоящих из активных сопротивлений, мощность равна произведению тока на напряжение, как в цепях постоянного тока.

Что же представляет собой вертикальный катет в треугольнике мощностей? Это реактивная или индуктивная мощность. Она не превращается ни в тепло, ни в свет, ни в механическую энергию, а служит в цепях переменного тока для создания магнитного поля.

### 3-6. Трехфазный ток

В каждую квартиру подводится однофазный переменный ток. Он течет по двум проводам, как и постоянный. Но постоянный ток по одному проводу течет к потребителю энергии, например к лампочке, а по другому — возвращается к источнику тока. Таким образом, в каждом проводе направление тока все время остается постоянным.

ным. Переменный ток непрерывно меняется в обоих проводах с частотой 50 *пер/сек*.

Для питания электродвигателей, устройство которых описано в гл. 4, применяется однофазный ток осветительной сети. Для того чтобы знать, откуда он поступает, надо хотя бы вкратце ознакомиться с трехфазным током.

Все электростанции вырабатывают трехфазный переменный ток, который имеет ряд преимуществ перед однофазным. На рис. 3-7 схематически изображен принцип

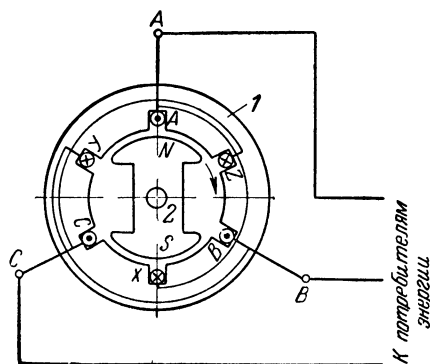


Рис. 3-7. Принцип действия трехфазного генератора.

действия генератора трехфазного тока, состоящего из неподвижной части 1, называемой статором, и вращающейся части 2, называемой ротором. В пазы статора вложены три катушки, намотанные из медного провода. Для упрощения объяснений будем считать, что каждая катушка представляет собой один виток, состоящий из двух проводников. Проводники одного витка вложены в пазы, расположенные на диаметрально противоположных точках окружности статора. Таким образом, один виток лежит в пазах A и X, второй — в пазах B и Y, а третий — в пазах C и Z; A, B, C — начала витков, а X, Y, Z — концы. Начала симметрично расположены по окружности и расстояние между ними измеряется дугой 120°. Также симметрично расположены и концы витков. Каждый виток будем называть фазой обмотки статора, обозначая фазы буквами, которыми обозначены их начала. Так, например, виток, лежащий в пазах A и X, будем называть фазой A. На рисунке дугами показаны соединения проводников, образующих один виток. На роторе укреплен двух-

полюсный магнит, состоящий из двух широких наконечников  $N$  и  $S$  и узкой перемычки между ними. В генераторах трехфазного тока на этот магнит намотана обмотка, питаемая постоянным током. Для упрощения рисунка обмотка здесь не показана, как будто это постоянный магнит. Магнит ротора вращается при помощи механического двигателя в направлении вращения стрелок часов.

Сравнивая генератор переменного тока с машинной постоянной тока на рис. 2-6, мы видим, что в генераторе переменного тока отсутствует коллектор, так как не надо выпрямлять ток. Обмотка статора, в которой наводится э. д. с., помещена на неподвижной части для того, чтобы можно было соединить потребителей с обмоткой генератора без контактных колец и без щеток. Это упрощает изготовление генератора и делает его работу более надежной. Контактные кольца нужны только для подвода постоянного тока к обмотке ротора. Ток этот небольшой, и изготовление контактных колец для него не представляет трудностей. В генераторах постоянного тока проводники якоря пробегают в магнитном поле неподвижных полюсов. В генераторе переменного тока проводники неподвижны, а магнит вращается. От такой перестановки принцип электромагнитной индукции не нарушается.

Теперь посмотрим, как получается трехфазный ток. В положении, изображенном на рис. 3-7, полюса магнита находятся против проводников фазы  $A$ . По закону правой руки в проводнике  $A$  ток будет направлен к нам, а в проводнике  $X$  — от нас. В момент, когда под проводником проходит середина полюса, в проводнике наводится наибольшая э. д. с., соответствующая верхней точке синусоиды. В следующие моменты времени полюсные наконечники будут уходить из-под проводников фазы  $A$ , и э. д. с. в них будут уменьшаться. Когда магнит повернется на  $90^\circ$ , магнитное поле не будет пересекать проводников фазы  $A$ , и э. д. с. в них будет равна 0.

Когда ротор повернется на  $180^\circ$ , северный полюс магнита будет против проводника  $X$ , а южный полюс — против проводника  $A$ . Нетрудно сообразить, что направления наведенных в проводниках э. д. с. изменятся на обратные.

После поворота ротора на  $270^\circ$  полюсные наконечники той же полярности, что и показанные на рис. 3-7, будут снова приближаться к проводникам фазы  $A$ , и э. д. с. в них будут увеличиваться. Когда ротор придет в положение, показанное на рисунке, э. д. с. в проводниках до-

стигнут наибольшего значения. На этом заканчивается период изменения э. д. с. и токов в фазе *A*.

Но ведь при вращении ротора наконечники магнита проходили и под проводниками двух других фаз, поэтому и в них происходили такие же изменения э. д. с. и токов. Изменения эти совершались в различных фазах не одновременно: если наибольшая э. д. с. в фазе *A* была в положении, указанном на рисунке, то в фазе *B* она наступит, когда ротор установится в положение *B—Y*. Сколько же времени пройдет между этими положениями ротора? Это нетрудно определить: для получения тока с частотой  $50 \text{ пер/сек}$  ротор должен вращаться со скоростью  $50 \text{ об/сек}$ , расстояние от паза *A* до паза *B* составляет  $\frac{1}{3}$  окружности, следовательно, промежуток времени между максимальными значениями э. д. с. одного и того же направления в разных фазах составляет  $\frac{1}{150} \text{ сек}$ .

Генераторы переменного тока называются синхронными, потому что ротор вращается с одинаковой скоростью (синхронно) с изменением э. д. с. и токов в проводниках.

Мы видели, как образуется трехфазный ток в проводниках обмотки генератора. Теперь осталось рассмотреть, как соединяется трехфазный генератор с потребителями энергии. Обмотка статора состоит из трех фаз. Каждая фаза имеет начало и конец обмотки. Следовательно, трехфазная обмотка имеет всего шесть выводов. Надо ли все шесть выводов обмотки соединять с потребителями?

Для ответа на этот вопрос ознакомимся с одним интересным свойством трехфазного тока. Токи подобно силам в механике можно изображать векторами. Соединим концы всех трех фаз в одну точку, а к началам фаз присоединим потребителей переменного тока. Токи в фазах можно представить тремя векторами, выходящими из одной точки и расположенными друг от друга на  $\frac{1}{3}$  окружности, т. е. на  $120^\circ$  (рис. 3-8). Попробуем найти сумму токов во всех трех фазах в положении *1*. Если бы они были расположены по одному направлению, то их геометрическая сумма была бы равна алгебраической. Но векторы расположены под углом, и геометрическую сумму их можно получить как сумму проекций всех векторов на неподвижную ось, например на вертикальную. Возьмем длину каждого вектора равной  $1,7 \text{ см}$ . Проекция вектора *A* будет также равна  $1,7 \text{ см}$ . Для нахождения величин проекций векторов *B* и *C* проведем из их концов горизонталь-



ные пунктирные линии. Получим два прямоугольных треугольника с углами  $30^\circ$  и  $60^\circ$ . Проекции этих векторов на вертикальную ось будут иметь размеры  $0,85 \text{ см}$ , так как синус угла  $30^\circ$  равен  $0,5$ . В сумме они дадут отрезок длиной  $1,7 \text{ см}$ , направленный вниз, т. е. противоположно направлению вектора  $A$ . Таким образом, сумма векторов равна нулю.

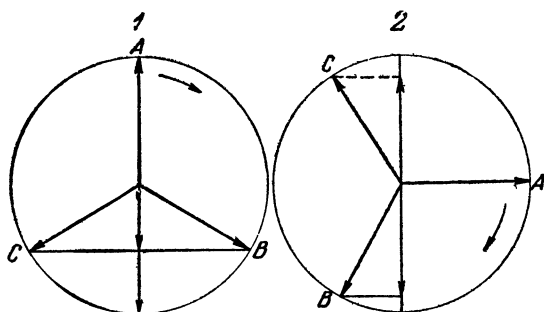


Рис. 3-8. Сумма токов в трех фазах.

При вращении ротора токи в фазах будут изменяться. Это равносильно тому, что мы будем поворачивать систему векторов в направлении вращения ротора. В положении 2 звездочка векторов повернута на  $90^\circ$  по часовой стрелке. Теперь проекция тока в фазе  $A$  равна 0, а проекции токов в фазах  $B$  и  $C$  равны и направлены противоположно, т. е. в сумме дадут нуль. Предоставляем читателям проследить, что сумма токов при повороте на  $180^\circ$  и  $270^\circ$  также будет равна нулю.

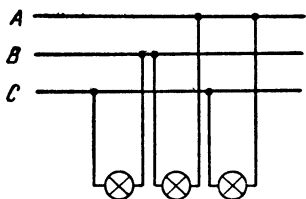


Рис. 3-9. Распределение трехфазного тока между потребителями.

Таким образом, в трехфазной сети сумма токов всех трех фаз в любой момент равна нулю. Следовательно, нет необходимости от каждой фазы вести обратный провод, по которому ток возвращался бы от потребителя обратно в генератор. Трехфазный ток можно передавать по трем проводам. Остальные три провода трехфазной обмотки соединяются внутри генератора.

Для освещения отдельных квартир или небольших домов в них вводится однофазный ток. Для получения однофазного тока достаточно взять ответвление от любой пары

проводов трехфазной сети. Очевидно, что возможны три комбинации пар проводов, а именно от фаз *A* и *B*, фаз *B* и *C*, фаз *A* и *C* (рис. 3-9). Для равномерной нагрузки трехфазной сети необходимо, чтобы потребители однофазного тока потребляли примерно одинаковую мощность.

### 3-7. Трехфазные асинхронные двигатели

Для чего же нужен трехфазный ток, если в каждую квартиру подводится только одна фаза? Не надо забывать, что большая часть электрической энергии потребляется заводами. А на заводах есть такие потребители энергии, которым нужен трехфазный ток,— это в первую очередь электродвигатели.

На рис. 3-10 показан статор трехфазного двигателя. Он составлен из штампованных листов с пазами, в которые вложены проводники трехфазной обмотки. Обмотка

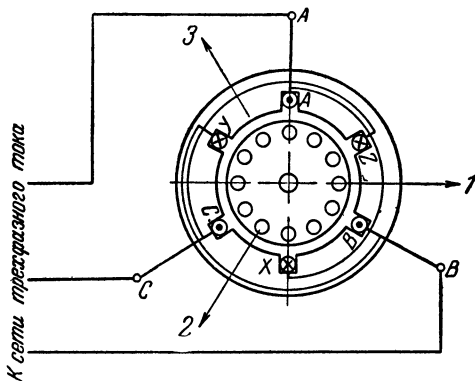


Рис. 3-10. Принцип работы трехфазного двигателя.

соединена так же, как в генераторе, и три выводных проводника ее присоединяются к сети трехфазного тока. Очевидно, что изменения тока в фазах будут происходить так же, как в фазах генератора. Каждая фаза обмотки создает магнитное поле, которые складываются между собой. Для простоты будем рассматривать только магнитные поля тех фаз, в которых ток в данный момент имеет наибольшее значение. Пусть на рис. 3-10 наибольшее значение тока будет в фазе *A*. Она создаст магнитное поле, ось которого *1* перпендикулярна плоскости витка и по правилу буравчика направлена вправо. Через одну треть пе-

риода наибольшее значение тока будет в фазе *B*. Ось магнитного поля переместится в положение 2. Еще через  $\frac{1}{3}$  периода наибольшее значение тока будет в фазе *C*, и ось магнитного поля займет положение 3. Отсюда можно сделать вывод, что трехфазная обмотка, питаемая трехфазным током, создает магнитное поле, которое вращается с такой же скоростью, как ротор генератора.

Вставим в отверстие статора ротор. В проводниках его обмотки вращающееся поле статора будет наводить э. д. с., и в замкнутых проводниках обмотки ротора потечет ток. Взаимодействие тока ротора с магнитным полем статора создаст вращающий момент и ротор начнет вращаться в ту же сторону, в какую вращается магнитное поле статора. Но может ли ротор вращаться с такой же скоростью, как поле статора? Очевидно, нет. Если бы ротор стал вращаться с одинаковой скоростью с магнитным полем статора, т. е. синхронно с ним, то проводники обмотки ротора не пересекались бы силовыми линиями магнитного поля. Тогда пропадет вращающий момент, и ротор замедлит скорость вращения. Но как только его скорость уменьшится, снова появится вращающий момент. Таким образом, ротор все время бежит за магнитным полем статора, но догнать его не может. Поэтому двигатель и получил название асинхронного (т. е. несинхронного). Разность скоростей вращения поля статора и ротора, отнесенная к скорости вращения поля статора, называется скольжением. Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с обмоткой ротора в виде ряда стержней, замыкающихся двумя кольцами на торцах ротора. Это самый простой двигатель, у которого нет ни щеток, ни контактных колец.

#### ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### ОДНОФАЗНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В предыдущей главе мы познакомились с замечательными свойствами переменного тока и трехфазными асинхронными двигателями. Но ведь в квартире нет трехфазного тока. Как же быть? В этой главе будет рассказано о том, как могут работать двигатели на однофазном токе. В зависимости от назначения они могут питаться электрической энергией или непосредственно от осветительной сети или через понижающий трансформатор.

#### 4-1. Коллекторный двигатель

Обратимся снова к двигателю постоянного тока, устройство которого показано на рис. 2-6. Прделаем такой опыт: присоединим к контактным винтам двигателя батарейку от карманного фонаря, а когда якорь двигателя начнет вращаться, быстро перевернем батарейку так, что теперь она будет касаться контактных винтов другими пластинками. Что же произойдет с двигателем? На первый взгляд кажется, что он будет вращаться в обратную сторону. Но, проделав этот опыт, вы убедитесь, что двигатель продолжает вращаться в ту же сторону. И в этом нет ничего удивительного. Ведь при перевертывании батарейки изменилась полярность ее пластинок, подключаемых к контактным винтам двигателя. Следовательно, изменилось направление тока одновременно и в якоре и в обмотке возбуждения. Применим правило левой руки. Отогнутый большой палец показывает в ту же сторону, значит, якорь двигателя не изменит направления вращения.

Непрерывное переключение батарейки равносильно тому, что двигатель питается переменным током. Разница только в том, что у такого переменного тока очень малая частота, так как невозможно поворачивать батарейку 100 раз в секунду. Этого и не требуется. Присоединим зажимы двигателя к трансформатору с таким же напряжением, как батарейка. Двигатель будет работать, хотя будет вращаться несколько медленнее, так как при переменном токе появилось индуктивное сопротивление обмоток.

Если через 10—15 мин прикоснуться рукой к корпусу двигателя, то заметим, что он сильно нагрелся. При работе от батарейки этого не было. Если вы внимательно прочли § 2-7, то сразу догадаетесь, отчего нагрелся корпус двигателя. При переменном токе в нем образовались вихревые токи и происходило перемагничивание. Следовательно, появились потери в стали, которые превратились в тепло. Для снижения этих потерь надо сделать корпус не из сплошной трубы, а из тонких листов (рис. 4-1). В статоре полюса выштампованы из листа заодно со стенкой корпуса. Поэтому форма штампованного листа получилась очень сложной и ее трудно выполнить в самодельном двигателе. В листах сделаны отверстия для заклепок 3, которые стягивают пакет статора.

Коллекторный двигатель с корпусом из штампованных листов годится как для работы на постоянном токе, так и на переменном. Поэтому его называют универсальным.

На рис. 4-1 показаны катушки 1, намотанные отдельно от статора, изолированные лентой и надетые на полюса. Для того чтобы катушка могла пройти через полюсный наконечник 2, она должна быть шире, чем показано на рисун-

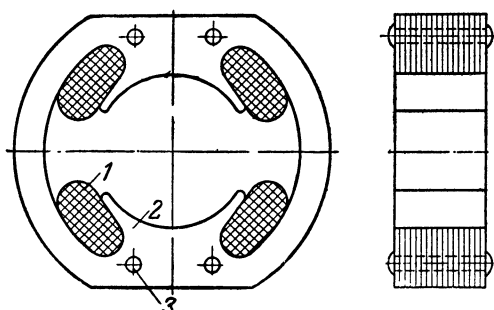


Рис. 4-1. Статор однофазного двигателя.  
1 — катушка; 2 — полюс; 3 — заклепка.

ке. Сначала надевают на полюс одну сторону катушки, а когда она вошла на свое место, натягивают другую сторону. После этого стороны катушки прижимают к боковым сторонам полюса. Для удержания катушки на полюсе крайние листы статора, не имеющие полюсных наконечников, отгибают на катушку.

На рис. 4-2 показана другая конструкция статора с магнитной системой не замкнутой, а открытой формы подковообразного магнита. Вторая особенность заключается в том, что у этого статора только одна катушка, намотанная непосредственно на статор. Она должна быть изолирована от сердечника статора, для чего сердечник обматывают несколькими слоями пропитанной в льняном масле или парафине бумаги 1, так чтобы общая толщина изоляции была не меньше 1 мм. Поверх бумаги на сердечник статора надевают два фланца 2 с квадратными отверстиями, вырезанные из картона толщиной 1,5 мм, пропитанного в парафине. При отсутствии картона такой толщины можно склеить фланцы из нескольких слоев. Остается один неясный вопрос: как же продеть фланцы через углы сердечника, которые шире окна во фланцах? Ответ на этот вопрос дает вид фланца на рис. 6-22. На нем вид-

на линия *a* — *б*. Это сквозная прорезь, сделанная острым ножом. Благодаря ей можно разогнуть концы фланца в разные стороны и надеть его прямо на середину сердечника.

Хотя у статора только одна катушка *3*, он двухполюсный, так как на концах подковы при прохождении через катушку тока образуются полюса — северный и южный. Преимущество такой конструкции заключается в том, что легче вырезать листы статора открытой формы при изготовлении самодельного двигателя.

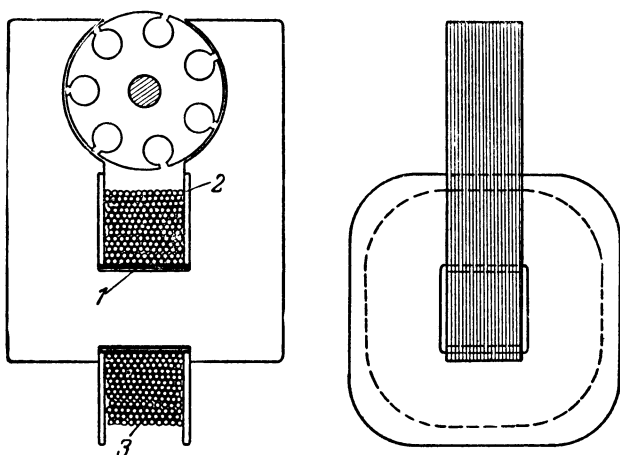


Рис. 4-2. Статор однофазного двигателя.

1 — пропитанная бумага; 2 — фланец; 3 — катушка.

Итак, коллекторный двигатель можно питать не только постоянным, но и переменным током. Следовательно, отпадают заботы об источнике постоянного тока. Однако коллекторные двигатели имеют один недостаток, который при переводе двигателя на питание переменным током еще усилится. В чем же заключается этот недостаток?

При работе двигателя между коллектором и щетками все время пробегают искорки. Они имеют высокую температуру. Ведь это маленькие электрические дуги между двумя электродами. А такие дуги при электросварке и в электрических печах легко расплавляют такие тугоплавкие металлы, как сталь. Если щетка электродвигателя представляет собой тонкую медную пластинку, то через несколько часов работы двигателя она перегорит. Одно-

временно обгорают и коллекторные пластины. При работе двигателя поверхность коллектора надо часто очищать от нагара стеклянной бумагой.

Вредное действие искорок заключается не только в изнашивании щеток и коллектора, но и в том, что они создают электромагнитные колебания, которые улавливаются радиоприемниками и телевизорами. Если включить такой двигатель, то в динамиках радиоприемников и телевизоров послышится треск, а на экране телевизора появятся светящиеся полосы. Электромагнитные колебания не оказывают никакого влияния только на работу динамиков и репродукторов, включенных в трансляционную сеть, так как в них нет радиоприемных устройств.

Можно ли сказать, что образование искорок зависит от качества выполнения коллектора и щеток? Оно, конечно, является одной из причин их образования, особенно в самодельных двигателях, которые выполнены не так точно, как заводские. Однако главной причиной является другое. При вращении коллектора щетки замыкают две соседние пластины коллектора (рис. 2-5), и витки обмотки, присоединенные к этим пластинам, также оказываются замкнутыми накоротко, т. е. на цепь с очень малым сопротивлением. В этот момент ток в обмотке якоря меняет направление. В следующий момент щетка сошла со стыка двух пластин, и витки обмотки разомкнулись, но в витках при изменении тока наводится э. д. с., а разрыв цепи под напряжением всегда сопровождается искрением. Погасите электрическую лампочку выключателем и в работающем радиоприемнике послышится щелчок.

Таким образом, искрение на коллекторе неизбежно. Но если заставлять двигатель попеременно работать от батарейки и от трансформатора, то при питании двигателя от трансформатора искрение усиливается, несмотря на то, что качество коллектора и щеток не изменилось. Когда по обмотке возбуждения протекает переменный ток, в витках обмотки якоря наводится еще одна э. д. с.— трансформаторная. Она называется так потому, что наводится она аналогично э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора — по закону взаимной индукции. Следовательно, теперь в витках обмотки наводятся две э. д. с., которые вызывают усиление искрения на коллекторе.

При увеличении напряжения искрение будет усиливаться. Поэтому самодельные коллекторные двигатели

постоянного и переменного тока следует выполнять на напряжение не выше 12 в.

Электромагнитные колебания можно снизить, если дать другой путь электрическим разрядам. Для этого щетки соединяют с землей через конденсаторы (рис. 4-3). Такое устройство называется фильтром. Устройство их на маленьком двигателе неудобно, особенно на движущихся моделях (электровозы, троллейбусы и т. п.).

Далее будет рассказано о двигателях, лишенных этого недостатка, так как у них нет коллектора и щеток, что облегчает их изготовление. Поэтому в области двигателей малой мощности будущее принадлежит бесколлекторным двигателям переменного тока.

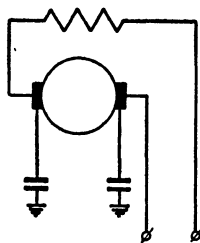


Рис. 4-3. Схема электрического фильтра.

## 4-2. Однофазные асинхронные двигатели

Изготовление коллекторных двигателей сложное дело, а в эксплуатации они неудобны, так как требуют тщательного ухода за щетками и коллектором и создают помехи радиоприему. Поэтому встала необходимость заменить их более простыми двигателями, свободными от этих недостатков. Такими двигателями являются асинхронные двигатели, которые находят широкое применение и в домашнем быту и в схемах автоматического управления различными процессами.

Принцип действия асинхронного двигателя заключается в том, что э. д. с. в обмотке ротора наводится переменным магнитным полем статора. Поэтому нет необходимости подводить ток к обмотке ротора от источника энергии, а следовательно, асинхронным двигателям не нужны скользящие контакты в виде щеток и контактных колец. Поскольку обмотка ротора не соединена с источником питания, можно ее не изолировать от сердечника ротора. Если забить в пазы ротора медные стержни, то ток пойдет по ним, а не по стальным листам, так как они имеют значительно меньшее электрическое сопротивление.

Ротор асинхронного двигателя (рис. 4-4), как и якорь, состоит из тонких листов 1 с отверстием в центре для вала 4 и круглыми пазами 5 по окружности. В пазы за-



биты стержни 2 из медной проволоки. На торцах ротора концы стержней должны быть соединены, для чего их припаивают к медным кольцам 3, вырезанным из медной полосы. Устройство ротора очень простое. Он набирается из кружков, оставшихся от листов статора. Пазы ротора должны быть скошены так, чтобы один конец стержня был против паза статора 1, а другой против паза 2.

Теперь посмотрим, как работает однофазный асинхронный двигатель. Возьмем статор от коллекторного двигателя (рис. 4-2) и вставим в него ротор асинхронного двигателя (рис. 4-4). Обмотку статора будем питать переменным током от трансформатора.

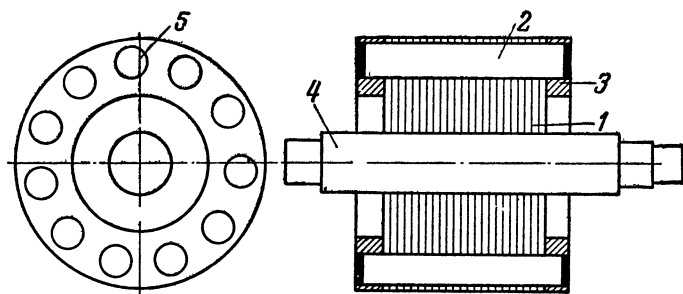


Рис. 4-4. Ротор асинхронного двигателя.

1 — лист ротора; 2 — стержень; 3 — кольцо; 4 — вал; 5 — паз.

Но здесь нас ждет разочарование. При соединении с трансформатором двигатель будет только гудеть, но ротор не стронется с места. Гудение означает, что в статоре двигателя есть магнитное поле. Следовательно, в стержнях ротора наводятся э. д. с. и по ним текут токи. Почему же ротор не вращается? Ведь работают же трехфазные асинхронные двигатели. Это объясняется тем, что в статоре трехфазного двигателя создается вращающееся магнитное поле, которое ведет за собой ротор, а в однофазном двигателе такого поля нет.

В однофазном двигателе создается так называемое пульсирующее поле, меняющееся так же, как переменный ток или переменное напряжение. Сначала поле усиливается и достигает максимального значения, затем ослабевает и доходит до нуля. В следующий момент магнитное поле будет изменяться так же, но в обратном направлении. Таким образом, магнитное поле повторяет все изменения тока в катушке возбуждения.

Для объяснения работы однофазного асинхронного двигателя пользуются следующим приемом. Разлагают однофазное магнитное поле на две составляющие ( $M_1$  и  $M_2$ , вращающиеся в противоположные стороны) и производят их геометрическое сложение (рис. 4-5).

В положении, изображенном на рис. 4-5,а, обе составляющие магнитного поля  $M_1$  и  $M_2$  совпадают, и результирующее поле  $M$  равно их арифметической сумме. Если повернуть составляющие  $M_1$  и  $M_2$  в разные стороны (рис. 4-5,б) и сложить их по правилу параллелограмма

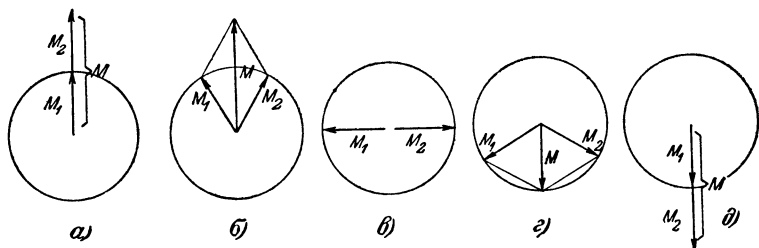


Рис. 4-5. Разложение однофазного поля на прямое и обратное.

подобно двум силам в механике, то результирующее магнитное поле  $M$  уменьшится. При дальнейшем вращении составляющие магнитного поля  $M_1$  и  $M_2$  будут расположены по горизонтальному диаметру (рис. 4-5,в). Очевидно, что сумма их будет равна нулю, т.е. магнитное поле пропадет.

При продолжении вращения составляющих (рис. 4-5,г) снова будут получаться значения магнитного поля, но направленные вниз, значит магнитное поле изменило направление. В положении рис. 4-5,д магнитное поле достигло наибольшего отрицательного значения. Изменения поля, показанные на рис. 4-5, соответствуют половине периода. Очевидно, что при дальнейшем повороте составляющих  $M_1$  и  $M_2$  изменения магнитного поля будут протекать периодически по закону синусоиды.

Разложение магнитного поля на составляющие показывает, что пульсирующее магнитное поле, создаваемое однофазным током, можно приравнять к действию двух магнитных полей, вращающихся с синхронной скоростью в противоположные стороны. Каждое поле тянет ротор в свою сторону. Пока действия обоих полей равны, ротор не сможет стронуться с места.

Возьмем конец вала двигателя двумя пальцами и силь-

но рывком повернем его по часовой стрелке. Ротор начнет вращаться, быстро увеличит скорость и будет вращаться со скоростью, близкой к синхронной. Так, если скольжение двигателя 5%, а синхронная скорость двухполюсного двигателя 3000 *об/мин*, то скорость вращения ротора будет  $3000 - 0,05 \cdot 3000 = 3000 - 150 = 2850$  *об/мин*. Если зажать пальцами конец вала, то можно почувствовать, что двигатель развивает вращающий момент. Он остановится только тогда, когда тормозящий момент будет больше вращающего момента электродвигателя.

Если после остановки ротора повернуть его пальцами в обратную сторону, двигатель будет работать, вращаясь против часовой стрелки. Таким образом, можно убедиться, что асинхронный двигатель работает на однофазном токе, но не может самостоятельно стронуться с места.

Как же можно объяснить, что однофазный двигатель работает после того, как его ротор сдвинули с места при помощи посторонней силы? Пока ротор был неподвижен, составляющие магнитного поля  $M_1$  и  $M_2$  действовали на него с одинаковыми силами в противоположные стороны. Но когда ротор начал вращаться, действия составляющих магнитных полей изменились: Составляющую, которая вращается в ту же сторону, куда ротор, назовем прямым полем, а другую — обратным полем. Стержни ротора пересекают прямое поле со скоростью скольжения, которое составляет около 5% от синхронной скорости. Скорость пересечения стержнями ротора обратного поля гораздо больше. Ротор вращается со скоростью, близкой к синхронной, а обратное поле вращается с синхронной скоростью ему навстречу. Поэтому суммарная скорость получается почти равной двойной синхронной скорости, и в стержнях ротора наводятся токи двойной частоты, т. е. около 100 *пер/сек*. При такой частоте сильно возрастает индуктивное сопротивление обмотки ротора. Согласно треугольнику мощностей (рис. 3-6) эти токи будут почти чисто реактивными, не создающими вращающего момента, а только ослабляющими обратное поле. Чем быстрее вращается ротор, тем больше ослабляется обратное поле и растет вращающий момент двигателя.

#### 4-3. Двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе

В трехфазном асинхронном двигателе обмотка статора создает вращающееся магнитное поле, поэтому ротор начинает вращаться самостоятельно в сторону вращения

магнитного поля. Трехфазное вращающееся магнитное поле создается тремя катушками, равномерно расположенными по окружности, токи в которых сдвинуты на  $\frac{1}{3}$  периода.

Из-за отсутствия в квартирах трехфазного тока для пуска однофазных двигателей пользуются двухфазным током, который также создает вращающееся магнитное поле. Для образования такого поля на статоре нужны две катушки, токи в которых будут сдвинуты по фазе на угол  $90^\circ$ . Подробно устройство однофазных двигателей с двумя обмотками будет описано в следующих параграфах, здесь же будет рассказано об однофазном самопускающемся двигателе, который по устройству занимает промежуточное место между коллекторными и однофазными асинхронными двигателями. Он носит название двигателя с короткозамкнутым витком на полюсе.

Возьмем статор однофазного двигателя (рис. 4-2) и сделаем в нем некоторые добавления (рис. 4-6). Просверлим в каждом полюсе круглое отверстие и пропилим ножовкой прорези, соединяющие отверстия с внутренней окружностью статора. В эти отверстия вставим медные стержни 1, согнутые в виде скобочки. Затем концы скобочек согнем и запаем. Таким образом, часть полюса оказалась охваченной медным витком. Эта часть составляет примерно  $\frac{1}{3}$  от общей ширины полюса. На концах полюсных наконечников пропилим небольшие канавки и забьем в них стальные полоски 2, которые называются магнитными шунтами, так как часть магнитного поля проходит через них, минуя ротор. Вот и все добавления, которые позволяют получить самопускающийся однофазный асинхронный двигатель.

При протекании переменного тока в катушке двигателя в короткозамкнутых витках также потекут токи, наводимые по закону взаимной индукции и направленные в каждый момент против тока в катушке статора. Действием короткозамкнутых витков и катушки статора создастся вращающееся магнитное поле, и ротор начнет вра-

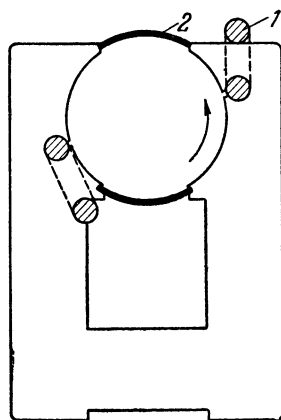


Рис. 4-6. Статор двигателя с короткозамкнутым витком на полюсе

1 — медный виток; 2 — магнитный шунт.

щаться. Двигатель обладает малым пусковым моментом, поэтому его можно запускать только вхолостую, т. е. без нагрузки, приложенной к концу вала. Магнитные шунты служат для улучшения пуска и работы двигателя. Двигатель может вращаться только в одну сторону, показанную стрелкой.

Двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе обычно применяют для настольных вентиляторов. Для пропеллера вентилятора при малой скорости вращения требуется небольшой крутящий момент. С увеличением скорости вращения требуемый момент растет пропорционально квадрату скорости. Поэтому после включения двигателя пропеллер сначала вращается очень медленно, затем постепенно начинает набирать скорость. От пуска до полного разгона пропеллера проходит несколько секунд. Такой двигатель может питаться переменным током непосредственно от осветительной сети.

#### 4-4. Двигатели с пусковыми обмотками

Наибольшее распространение получили однофазные асинхронные двигатели, у которых обмотка статора не сосредоточена в виде катушек, как у двигателей постоянного тока, а равномерно распределена по окружности ста-

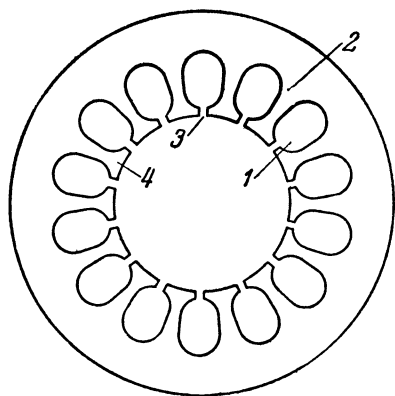


Рис. 4-7. Лист статора.

1 — паз; 2 — зубец; 3 — прорезь; 4 — коронка зубца.

речь 3 делают минимальной для того, чтобы по расширенной коронке зубца 4 магнитное поле могло легче прохо-

тора. Поэтому листы статора представляют собой кольца с пазами 1 на внутренней окружности (рис. 4-7). Между пазами образуются зубцы 2, которые служат для проведения магнитного поля. Чтобы сохранить магнитную индукцию по высоте зубца одинаковой, их делают постоянной ширины, поэтому пазы расширяются и приобретают грушевидную форму. В такие пазы можно поместить больше проводов, чем в пазы с параллельными боковыми стенками. Про-

дить в ротор. Ширина прорези делается такой, чтобы в нее свободно мог пройти один провод обмотки.

Катушки обмотки статора наматывают из изолированных проводов отдельно от статора на специальных шаблонах. Перед вкладыванием провода пазы изолируют полосками изоляционных материалов. Стороны катушек вкладываются в пазы по одному проводнику, поэтому обмотки называются всыпными. По окончании укладки обмоток в пазы края изоляционных полосок загибают в пазы и заклинивают полосками из картона.

Устройство ротора остается таким же, как было описано в § 4-2.

В пазы статора вкладывают катушки рабочей и пусковой обмоток. Обычно рабочая обмотка занимает  $\frac{2}{3}$  всех пазов, а пусковая  $\frac{1}{3}$ . Катушки рабочей и пусковой обмоток располагаются по окружности статора так, чтобы между ними был угол  $90^\circ$ . Выводы обеих обмоток присоединяют к контактному винтам, расположенным на дощечке из изоляционного материала (гетинакс или текстолит).

Обе обмотки приключаются к источнику переменного тока параллельно (рис. 4-8). В цепь пусковой обмотки включается пусковой элемент 1, представляющий собой сопротивление или конденсатор. Выключатель 2 служит для отключения пусковой обмотки после того, как ротор двигателя разовьет полное число оборотов. После этого пусковая обмотка становится ненужной, в ней только бесполезно будет затрачиваться энергия. Но при каждом пуске необходимо снова включать пусковую обмотку, так как иначе ротор не стронется.

Таким образом, двигатель пускается как двухфазный, а работает как однофазный. Пусковой элемент создает сдвиг токов по фазе в пусковой и рабочей обмотках, благодаря чему и создается двухфазное поле. Применение конденсатора в качестве пускового элемента позволяет получить от двигателя бóльший пусковой момент, чем получается при пусковом элементе, состоящем из сопротивления.

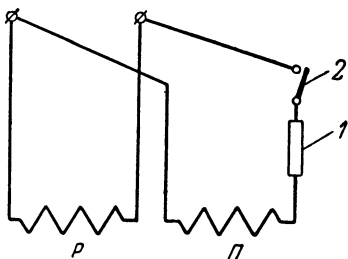


Рис. 4-8. Схема однофазного двигателя с пусковой обмоткой.

1 — пусковой элемент; 2 — выключатель.

Посмотрим, как же будут взаимодействовать магнитные поля, создаваемые рабочей и пусковой обмотками. Если токи в них сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , то их можно изобразить двумя синусоидами, у которых между начальными точками будет сдвиг, равный  $1/4$  периода, так как весь период составляет полную окружность, или  $360^\circ$  (рис. 4-9). Буквой  $P$  обозначена синусоида тока рабочей

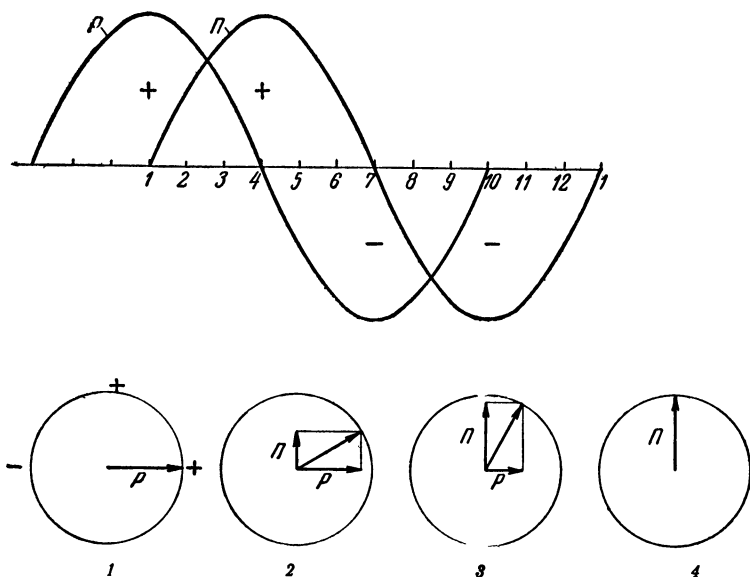


Рис. 4-9. Вращающееся поле однофазного двигателя с пусковой обмоткой.

обмотки, а буквой  $\Pi$  — пусковой. В разные моменты времени векторы токов будут находиться под разными углами, и поэтому их придется складывать геометрически.

Проведем несколько окружностей и обозначим их теми же цифрами, что и точки на оси синусоиды. Каждая окружность соответствует одному значению токов в рабочей и пусковой обмотках. Будем откладывать поля рабочей обмотки по горизонтальному диаметру; положительные значения поля вправо от центра окружности, а отрицательные — влево. Положительные значения полей пусковой обмотки будем откладывать по вертикальному диаметру вверх, а отрицательные — вниз. Радиус окружности возьмем равным половине наибольшего значения тока на синусоиде.

На рис. 4-9 показаны четыре окружности для точек синусоиды 1, 2, 3 и 4. Диагонали прямоугольника — это векторы результирующего поля. Предоставляем читателям построить окружности и сложить векторы для точек 5, 6, 7 и т. д. Сравнение круговых диаграмм показывает, что результирующее поле вращается с синхронной скоростью. Результирующее поле будет наводить токи в короткозамкнутой обмотке ротора и он придет во вращение.

Двигатель с пусковой обмоткой можно заставить вращаться в противоположную сторону, для этого достаточно изменить направление тока или в рабочей, или в пусковой обмотке (рис. 4-10).

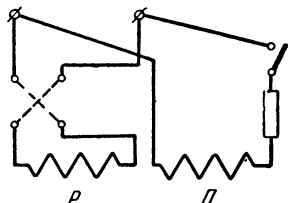


Рис. 4-10. Реверсирование однофазного двигателя.

#### 4-5. Конденсаторный двигатель

В двигателях с пусковой обмоткой после ее отключения  $1/3$  пазов статора остается неиспользованной. Поэтому однофазный двигатель с отключаемой обмоткой имеет пониженную полезную мощность. Для увеличения мощности однофазных двигателей в последнее время стали выпускать двигатели, у которых пусковая обмотка после пуска двигателя не отключается, а остается включенной с последовательно соединенным конденсатором.

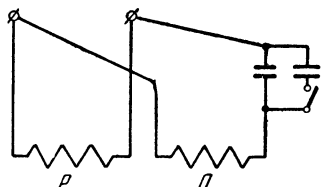


Рис. 4-11. Схема конденсаторного двигателя.

В момент пуска для увеличения пускового момента параллельно с этим конденсатором включается второй конденсатор. Такие двигатели называются конденсаторными; схема его показана на рис. 4-11.

У конденсаторного двигателя каждая обмотка занимает одинаковое число пазов. Увеличение мощности двигателя достигается за счет того, что работают две обмотки. Кроме того, в конденсаторном двигателе обратное поле почти пропадает, поэтому увеличивается мощность двигателя.

Конденсаторы в цепях переменного тока обладают замечательным свойством. Если индуктивность увеличивает угол между кажущейся и активной мощностями, то вклю-



ченная емкость уменьшает этот угол. Так, например, для двигателя мощностью 30 *вт* с отключаемой пусковой обмоткой  $\cos \varphi = 0,68$ , а для этого же двигателя, работающего с конденсатором,  $\cos \varphi = 0,98$ . В результате этого мощность конденсаторного двигателя при том же токе и напряжении повышается до 50 *вт*.

#### 4-6. Двигатель с массивным ротором

В последнее время начинают все больше применять асинхронные двигатели с ротором, выточенным из цельного куска стали (рис. 4-12). В заводских условиях вытачивают цилиндр с внутренним отверстием и насаживают его

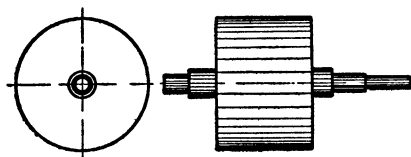


Рис. 4-12. Массивный ротор.

на вал. Благодаря этому уменьшаются отходы стали в виде стружки, снимаемой при обработке. При изготовлении одного или нескольких двигателей проще выточить ротор из цельного куска стали.

Преимущество двигателя с массивным ротором заключается в том, что он имеет большой пусковой момент и допускает широкое регулирование скорости. Но вследствие потерь от вихревых токов в роторе к. п. д. двигателя с массивным ротором понижается.

С массивным ротором можно строить только конденсаторные однофазные двигатели.

### ГЛАВА ПЯТАЯ

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 5-1. Зачем нужны расчеты?

При современном развитии техники каждую машину строят по предварительному расчету. При расчете определяют размеры машины, чтобы она надежно работала при минимальной затрате материала на изготовление.

Люди начали строить различные технические сооружения гораздо раньше, чем научились их рассчитывать. До наших дней сохранились сооружения, построенные не-

сколько тысяч лет тому назад, а наука о расчете на прочность зародилась немногим больше 300 лет. Строители этих сооружений определяли их размеры, как говорят, «на глаз», отчасти руководствуясь опытом уже построенных сооружений, и опыт этот обходился человечеству очень дорого. В истории строительной техники известны случаи огромных катастроф, происходивших от неумения рассчитывать. Так, почти 2 тыс. лет назад в Фидене, близ Рима, во время выступлений гладиаторов обрушился амфитеатр, под развалинами которого погибло 50 тыс. чел. В 1879 г. во время шторма обрушились 13 пролетов моста через реку Тей в Шотландии вместе с пассажирским поездом. Оказывается, при постройке моста не было учтено давление ветра. Известен еще ряд случаев разрушения мостов. Но, однако, рушились не только мосты, падали фабричные трубы, взрывались паровые котлы, разлетались в куски вращающиеся маховики под действием центробежных сил. Современные сооружения, построенные на основании расчетов, обладают необходимой прочностью, а материалов на них израсходовано в десятки раз меньше, чем на сооружения в древности.

Расчет электрических машин не ограничивается проверкой механической прочности; электрическая машина должна давать требуемую мощность; изоляция ее обмоток должна выдерживать без разрушения рабочее напряжение; при работе части машины не должны нагреваться выше допустимой температуры; характеристики ее должны удовлетворять техническим требованиям.

Электрическая машина существует не много лет. Трехфазный ток и самые распространенные асинхронные двигатели были изобретены М. О. Доливо-Добровольским только в 1892 г. Но и за этот относительно короткий срок достигнуты большие успехи в области проектирования электрических машин. Если двигатель мощностью 10 кВт в 1913 весил 200 кг, то вес современного двигателя такой же мощности не превышает 66 кг.

В этой главе будут изложены методы и примеры расчета электрических двигателей мощностью в несколько ватт. Может вызвать недоумение и даже улыбку необходимость расчета таких малюток. Ведь не одна тысяча электродвигателей построена нашими модельстами без расчетов и работает.

Конечно, построить электродвигатель для модели электровоза без расчетов риск небольшой: если сгорит изоля-

ция обмотки, можно намотать новую; если он не стронет модель электровоза с места, то ее можно и рукой подтолкнуть.

В предисловии было сказано, что книга эта является не забавой, а первой ступенью в овладении техникой изготовления настоящих электродвигателей малой мощности (микродвигателей). В современной технике электродвигатели играют важную роль. Ни одна автоматическая схема не обходится без большого количества микродвигателей: выйдет из строя один такой двигатель — и океанский пароход может сбиться с курса и потерпеть аварию; не будет выдержана требуемая температура в мартеновской печи — и плавка пойдет в брак; самолет потеряет управление и может сбиться с курса; счетная аналитическая машина перестанет считать; двигатель проигрывателя будет изменять скорость вращения — и приятная музыка превратится в вой. Это только очень немногие примеры применения микродвигателей и их роли в различных отраслях техники.

Таким образом, ясно, что двигатель должен надежно выполнять свою работу и удовлетворять техническим условиям, которые к нему предъявляются.

Теперь интересно подсчитать расход материалов на его изготовление. По непреложному закону электротехники, чем меньше мощность электрической машины, тем больше расходуется материалов на изготовление единицы мощности. Например, современный турбогенератор мощностью 100 000 *квт* весит около 200 *т*, или 200 000 *кг*. Чтобы определить, какой вес приходится на 1 *квт* мощности, надо общий вес разделить на мощность  $\frac{200\ 000}{100\ 000} = 2$  *кг/квт*. Микродвигатель же мощностью 1 *вт* весит 1,2 *кг*. Таким образом, для получения мощности в 1 *квт* надо взять 1 000 таких двигателей с общим весом 1 200 *кг*. Посчитайте, сколько металла можно сэкономить, если в народном хозяйстве работают миллионы электродвигателей и если вес их снизить хотя бы на 1%. Это можно сделать, изучая опыт работы построенных двигателей и совершенствуя методы их расчета.

## 5-2. О расчете электродвигателей

Расчет электродвигателя состоит из нескольких этапов. Сначала определяют главные размеры двигателя, т. е. диаметр и длину ротора. Затем производят расчет зубцо-

вого слоя, т. е. размеры пазов и зубцов, а также укладку проводов обмотки в пазах статора и ротора. Далее определяют магнитный поток и индукции в основных частях статора и ротора, при этом определяются обмоточные данные, т. е. число витков и диаметр провода обмотки возбуждения.

В коллекторных машинах ведется расчет размеров коллектора, количества и размеров щеток. Затем определяют потери мощности внутри двигателя и к. п. д. Ведут специальные расчеты для построения характеристик. И, наконец, зная потери и условия охлаждения двигателя, подсчитывают, до какой температуры нагреются его части при работе под нагрузкой. Расчеты на прочность в двигателях малой мощности заключаются в проверке прочности вала, подшипников, коллектора и пазовых клиньев, удерживающих обмотку в пазах при вращении ротора.

Если провести все эти расчеты, то заполнится целая общая тетрадь. И хотя все расчеты проводятся на основе алгебры и основ тригонометрии и поэтому доступны каждому десятикласснику, но для начинающего электрика можно обойтись сокращенными расчетами. После такого расчета легко будет пользоваться специальными учебниками по расчету электрических машин.

К сокращенным расчетам относятся: определение главных размеров двигателя, расчет зубцового слоя, определение размеров магнитного сердечника и нахождение обмоточных данных, т. е. диаметров проводов и числа витков. Эти расчеты займут не более пяти страниц в тетради.

Остальных расчетов можно избежать, руководствуясь советами, которые будут даны при расчете. Например, если в двигателе плотности тока в обмотках и индукции в магнитных сердечниках не будут выходить за пределы рекомендованных, то можно надеяться, что двигатель не подвергнется при работе чрезмерному нагреву. Что же касается к. п. д., то его выбирают по графику рис. 5-3 на стр. 70.

Расчет электродвигателя представляет собой пример технического расчета, который несколько отличается от решения математических задач. Основная особенность технических расчетов заключается в том, что они не обязательно должны быть абсолютно точными, а допускают некоторые приближения. Результаты при вычислении формул совсем необязательно должны получаться целыми

числами. И потому, если в формуле надо разделить 2 на 3, то нельзя сказать: «не делится» и на этом прекратить расчет.

С другой стороны, получая дроби, не следует стремиться к вычислению большого числа знаков после запятой. Вполне достаточно определить десятые и сотые доли. При округлении результата и отбрасывании лишнего десятичного знака, остающийся знак должен быть увеличен на 1, если отбрасываемый знак больше пяти. Например, 42,129 округляем до 42,13; 34,262 округляем до 34,26. При оперировании большими числами не только не следует вычислять дробную часть, но и в целой части можно последние цифры заменить нулями. Так, значения магнитных индукций достаточно определять с двумя нулями на конце (10 500 *гс*, а не 10 582 *гс*).

При вычислении витков нет необходимости вычислять до дробных частей, например 132,24 витка, так как число витков при намотке может быть только целым числом.

Упрощения и приближения в технических расчетах делаются не только для ускорения расчета. Большая точность в них просто не нужна. Допустим, что вы вычислили потребляемый двигателем ток с точностью до тысячных долей ампера, а щитовой амперметр может измерить этот ток с точностью только до пол-ампера; точные расчеты окажутся излишними. Но этого мало. Если по расчету будут изготовлены 10 двигателей, то сопротивления обмоток будут различными, хотя все они изготовлены из одних и тех же материалов по одинаковым размерам. Это происходит потому, что все детали имеют некоторые отступления от теоретических размеров. Например, если на катушке с проводом написан его диаметр 1,56 *мм*, то фактически размер диаметра может отличаться на 2% в ту или другую сторону. Вот почему все 10 двигателей не будут совершенно одинаковыми.

Если допускаются некоторые расхождения между расчетами и данными испытания для двигателей заводского изготовления, то в самодельном двигателе они могут быть еще больше, так как при изготовлении не в заводских условиях невозможно пользоваться ни точными станками, ни измерительными инструментами.

Из этого не следует делать неправильный вывод, что технические расчеты вообще не нужны. Расхождения между расчетом и опытом могут быть в пределах 10% или даже 20%. А «на глаз», да еще без достаточного практи-

ческого опыта можно ошибиться и в несколько раз.

При выполнении технических расчетов надо внимательно следить за размерностью подставляемых в формулы величин, которые будут везде указаны, ибо, подставив в формулу какой-нибудь размер вместо сантиметров в миллиметрах, вы ошибетесь в 10 раз; если же это сечение, то ошибка возрастет в квадрате, т. е. в 100 раз.

Все расчеты можно производить, пользуясь арифметическими правилами. При этом в формулах с числителем и знаменателем надо как можно шире пользоваться сокращениями для упрощения расчета. Руководствуясь изложенными выше соображениями, сокращения можно производить, если числа не делятся без остатка. Например, большой ошибки не будет, если сократить число  $\pi$  с тройкой.

При технических расчетах лучше всего пользоваться широко распространенными логарифмическими линейками (рис. 5-1). Линейка позволяет из длинной формулы получить готовый результат даже без знания результатов промежуточных вычислений. Все технические расчеты на заводах производятся на линейке, что во много раз ускоряет процесс расчета.

Линейка приучит и к технически целесообразным округлениям результатов. На ней можно получить только три или четыре значащих цифры ответа, а больше и не нужно.

Научитесь только правильно определять число цифр целой части числа.

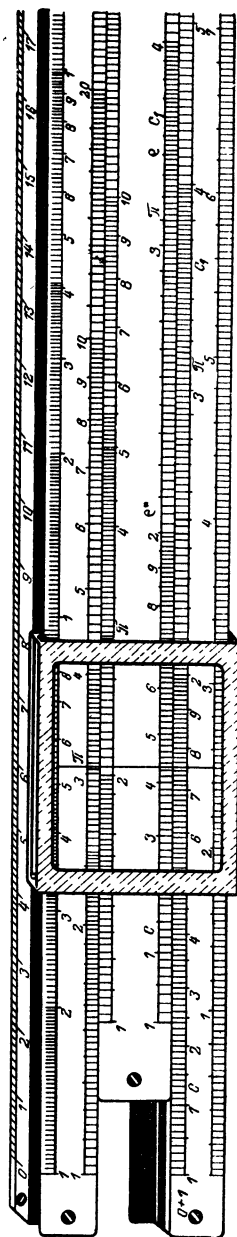


Рис. 5-1. Логарифмическая линейка.

### 5-3. Обмоточные провода

Для расчета любого типа двигателя требуется пользоваться некоторыми техническими данными: диаметры обмоточных проводов, марки проводов и их изоляция, данные для расчета магнитной цепи двигателя, размеры щеток, размеры шарикоподшипников и другие.

При расчете двигателя по формулам, которые будут приведены далее, вычисляется сечение провода для обмотки. Пользуясь формулой  $\pi r^2$ , нетрудно было бы определить необходимый диаметр провода. Но диаметр провода нельзя выбирать любым, так как обмоточные провода изготавливаются только по стандарту, на основании которого составлена табл. 5-1.

Таблица 5-1

Круглые обмоточные провода

Диаметр $d$ , мм	Сечение $s$ , мм <sup>2</sup>	Вес 100 м провода, кг	Сопротивление 100 м провода при 15° С, Ом	Диаметр $d$ , мм	Сечение $s$ , мм <sup>2</sup>	Вес 100 м провода, кг	Сопротивление 100 м провода при 15° С, Ом
0,1	0,008	0,007	227	0,44	0,152	0,135	11
0,11	0,009	0,008	181	0,47	0,173	0,154	10
0,12	0,011	0,010	152	0,51	0,204	0,182	8,4
0,13	0,013	0,012	130	0,55	0,238	0,211	7,2
0,14	0,015	0,014	112	0,59	0,273	0,243	6,3
0,15	0,018	0,016	97	0,64	0,322	0,286	5,3
0,16	0,020	0,018	86	0,69	0,374	0,332	4,6
0,17	0,023	0,020	76	0,74	0,430	0,382	4,0
0,18	0,025	0,022	67	0,8	0,503	0,447	3,4
0,19	0,028	0,025	61	0,86	0,581	0,516	3,0
0,20	0,031	0,028	55	0,93	0,679	0,604	2,5
0,21	0,035	0,031	50	1,0	0,785	0,698	2,2
0,23	0,041	0,037	42	1,08	0,916	0,814	1,9
0,25	0,049	0,043	35	1,16	1,057	0,94	1,6
0,27	0,057	0,051	30	1,25	1,227	1,091	1,4
0,29	0,066	0,059	26	1,35	1,481	1,273	1,2
0,31	0,075	0,067	23	1,45	1,651	1,468	1,0
0,33	0,085	0,076	20	1,56	1,911	1,699	0,9
0,35	0,096	0,085	18	1,68	2,22	1,971	0,8
0,38	0,113	0,100	15	1,81	2,57	2,29	0,7
0,41	0,132	0,117	13				

Если, например, по расчету получилось сечение провода 1,5 мм<sup>2</sup>, то надо по таблице подобрать сечение, которое ближе всего подходит к 1,5 мм<sup>2</sup>. Таким сечением в таблице будет  $s=1,481$  мм<sup>2</sup>. В первой колонке таблицы можно

узнать, что этому сечению соответствует диаметр стандартного провода  $d=1,35$  мм.

Стандарты имеют очень важное значение в народном хозяйстве. Они охватывают очень многие виды изделий. На коробке спичек стоит ГОСТ 1820-45, т. е. Государственный общесоюзный стандарт 1820, издания 1945 г. Все заводы, выпускающие спички, должны выдерживать требования стандарта в отношении размеров самих спичек и их упаковки, количества спичек в коробке и ряд других требований. Номера стандартов значатся на электрических лампочках, тетрадях, упаковках расфасованных продуктов.

Если бы не было стандарта на обмоточные провода, то в промежутке между диаметрами 1,35 и 1,45 мм (см. табл. 5-1) могли бы появиться провода диаметром 1,36, 1,37 мм и т. д. Чем больше размеров проводов, тем труднее заводу их изготовлять. Гораздо быстрее можно изготовить 100 кг провода одного размера, чем 10 размеров проводов по 10 кг каждого, потому что при изменении диаметра провода надо снова налаживать станок, на что уходит много времени. Заводы изготовляют провода с размерами по стандартам, выполнение которых обязательно для всех заводов и учреждений Советского Союза.

В табл. 5-1 указаны размеры голых проводов, а для обмоток двигателей, за исключением стержней короткозамкнутых обмоток роторов, применяются изолированные провода. Существует несколько марок обмоточных проводов, отличающихся изоляцией. Изоляция провода ПЭЛ состоит из эмалевой пленки обычно черного цвета, с эмалью не растворяющейся в изоляционных лаках, которыми пропитывают обмотки на заводах. Название провода ПЭЛ расшифровывается так: провод, эмалированный, лакостойкий. Провод марки ПЭВ-2 изолирован очень прочной эмалью, золотистого цвета, которая носит название «винифлекс». Цифра 2 показывает, что провод покрыт эмалью 2 раза. Если поверх эмалевой пленки провод обмотан одним слоем шелковой пряжи, то марка провода будет ПЭЛШО, а при обмотке хлопчатобумажной пряжей — ПЭЛБО.

В табл. 5-2 дана двусторонняя толщина изоляции проводов тех марок, какие применяются для двигателей малой мощности. Для определения диаметра изолированного провода надо к диаметру голого провода, взятому по табл. 5-1, прибавить толщину изоляции из табл. 5-2.



Толщина изоляции обмоточных проводов, мм

Марка провода	Диаметр провода, мм								
	0,1—0,19	0,2—0,25	0,27—0,29	0,31—0,38	0,41—0,49	0,51—0,69	0,72—0,96	1,0—1,45	1,5—2,1
ПЭЛ	0,020	0,025	0,030	0,040	0,045	0,050	0,060	0,070	0,080
ПЭВ-2	0,040	0,045	0,060	0,060	0,070	0,080	0,090	0,110	0,112
ПЭЛШО	0,075	0,090	0,100	0,105	0,110	0,115	0,125	0,135	—
ПЭЛБО	—	0,125	0,155	0,160	0,165	0,170	0,180	0,210	0,210

Например диаметр голого провода равен 0,44 мм, а марка провода ПЭЛ. Диаметр 0,44 в табл. 5-2 заключается между размерами 0,41 и 0,49, которые обозначены в верхней строке таблицы. В столбике под этими цифрами находим изоляцию провода ПЭЛ, равную 0,045 мм. Диаметр изолированного провода будет  $0,44 + 0,045 = 0,485$  мм.

Для обмоток на 127 и 220 в лучше всего пользоваться проводом марки ПЭВ-2, так как он имеет тонкую, но очень прочную изоляцию.

#### 5-4. Таблица намагничивания

При расчете каждого двигателя приходится определять данные намагничивающей обмотки, которая создает магнитное поле. В коллекторных двигателях намагничивающей обмоткой является обмотка полюсов, а в асинхронных двигателях — обмотка статора.

Способность катушки создавать магнитное поле называется ее намагничивающей силой (сокращенное обозначение н. с.) или магнитодвижущей силой (сокращенное обозначение м. д. с.). Намагничивающая сила катушки пропорциональна произведению числа витков на ток катушки и вычисляется в ампер-витках. Две катушки, из которых одна имеет 100 витков при токе 0,1 а, а другая 10 витков при токе 1 а, имеют одинаковую н. с. 10 а-в.

Если силовые линии магнитного поля проходят через воздух, то н. с. катушки пропорциональна индукции и длине магнитных силовых линий. Например, чем больше

зазор между статором и ротором, тем больше должна быть н. с. катушки. Но когда силовые линии магнитного поля проходят через железный сердечник электромагнита, прямая пропорциональность нарушается. Здесь н. с. катушки сильно изменяется в зависимости от магнитной индукции. Эту зависимость определяют по графикам или по таблицам. В табл. 5-3 по горизонтальной оси отложены магнитные индукции в сотнях гаусс, а по вертикальной оси — в тысячах гаусс.

Таблица 5-3

Таблица намагничивания листовой стали

В, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
5 000	2,5	2,55	2,6	2,65	2,70	2,75	2,8	2,85	2,9	2,93
6 000	2,95	3,0	3,05	3,1	3,15	3,2	3,25	3,3	3,35	3,4
7 000	3,45	3,5	3,55	3,6	3,7	3,75	3,8	3,85	3,9	4,0
8 000	4,05	4,1	4,15	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
9 000	4,85	4,9	4,95	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
10 000	5,7	5,8	5,9	6,0	6,15	6,3	6,42	6,55	6,65	6,8
11 000	6,9	7,0	7,2	7,3	7,5	7,65	7,8	7,9	8,0	8,25
12 000	8,45	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,9	10,0	10,5
13 000	10,8	11,1	11,5	11,8	12,2	12,6	13,0	13,5	14,0	14,5
14 000	15,0	15,3	16,0	16,5	17,0	17,5	18,3	19,2	20,0	21,0
15 000	22,7	24,5	25,6	27,1	28,8	30,5	32,0	34,0	36,5	37,5
16 000	40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5	55,8	59,5	62,3	66,0
17 000	70,5	75,3	79,5	84,0	88,5	93,2	98,0	103,0	108,0	114,0

Если в железном сердечнике, например, магнитная индукция будет 10 500 гс, то надо взять пересечение горизонтальной строки против 10 000 гс с вертикальным столбиком против 500 гс. На пересечении найдем число 6,3. Это — напряженность поля  $H$ . Чем выше магнитная индукция, тем большая намагничивающая сила должна быть создана катушкой, чтобы провести силовые линии через сердечник. Намагничивающую силу катушки можно определить, умножив напряженность поля  $H$  на длину силовых линий  $l$ .

**Пример.** На стальное кольцо 1 (рис. 5-2) намотана катушка 2 из 1 000 витков изолированной медной проволоки. Индукция в кольце должна быть 10 500 гс. Какой ток надо пропустить через катушку, чтобы создать в кольце такую индукцию?

Напряженность поля  $H$  при этой индукции известна из табл. 5-3. Теперь надо узнать длину средней силовой линии. Это будет длина окружности с диаметром 100 мм, как указано на рис. 5-2:

$$l = 100 \cdot 3,14 = 314 \text{ мм} = 31,4 \text{ см.}$$

Намагничивающая сила катушки

$$I\omega = Hl = 6,3 \cdot 31,4 = 198 \text{ а-в.}$$

Через катушку надо пропустить ток

$$I = 198 : 1000 = 0,198 \text{ а.}$$

Теперь посмотрим, какой ток надо пропустить через эту катушку, чтобы индукция возросла в 1,5 раза, т. е. была 15 800 гс.

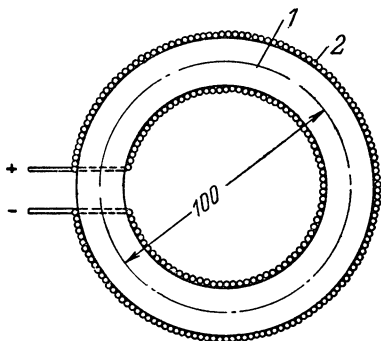


Рис. 5-2. Намагничивание стального кольца катушкой.

1 — стальное кольцо; 2 — витки катушки.

Для этой индукции в таблице находим напряженность поля 36,5, н. с. катушки должна быть:

$$I\omega = Hl = 36,5 \cdot 31,4 = 1150 \text{ а-в,}$$

а ток катушки

$$I = 1150 : 1000 = 1,15 \text{ а.}$$

Таким образом, магнитная индукция возросла только в 1,5 раза, а н. с. катушки потребовалась в 6 раз больше. Исходя из этого, слишком большие индукции в железных сердечниках иметь невыгодно: ведь при увеличении тока должно увеличиваться и сечение провода катушки, а следовательно, и вес меди.

Этой таблицей придется пользоваться при расчете каждого двигателя. Если в отдельных участках сердечника будут разные индукции, то каждый участок рассчитывают отдельно и н. с. участков складывают.

## 5-5. Номинальные данные двигателя

Чтобы приступить к расчету двигателя, необходимо знать его номинальные данные. Номинальными данными называются мощность, скорость вращения и напряжение, которые у двигателей заводского изготовления указаны на металлическом щиточке, прикрепленном к корпусу двигателя, или выгравированы на самом корпусе.

Мощность двигателя выражается в ваттах. Это не потребляемая от источника тока мощность, а механическая мощность на валу. Выбор мощности зависит от назначения двигателя. Так, при скорости вращения 3000 *об/мин* для привода движущихся моделей (электровоз, подъемный кран) достаточна мощность 3 *вт*; для небольшого настольного вентилятора 5 *вт*; для швейной машины 10—15 *вт*, для электропроигрывателя 1—2 *вт*. Чтобы судить о величине этих мощностей, достаточно сказать, что сильный мужчина, вращая рукоятку, может развивать мощность около 30 *вт* непрерывно не более 1 ч. Мощность двигателя тесно связана со скоростью вращения.

При заданной мощности, чем выше скорость вращения двигателя, тем меньше его размеры и тем меньше потребуются материалов. Коллекторные двигатели постоянного и переменного тока могут быть рассчитаны на любую скорость вращения — до 10 000 *об/мин* и выше. Однако, исходя из условий надежной работы щеток на коллекторе, не рекомендуется строить самодельные двигатели на скорость вращения более 5 000 *об/мин*.

У асинхронных двигателей всех типов скорость вращения ротора зависит от частоты переменного тока, которая остается неизменной — питается ли двигатель непосредственно от осветительной сети или через понижающий трансформатор. Для двухполюсных двигателей, которые чаще всего применяются, синхронная скорость при частоте 50 *пер/сек* будет 3 000 *об/мин*. Учитывая скольжение, ротор будет вращаться со скоростью около 2 900 *об/мин*.

Такие высокие скорости вращения могут быть непосредственно использованы только в вентиляторах, у которых пропеллер насаживается прямо на конец вала двигателя. Для движущихся моделей между двигателем и приводимым в движение механизмом помещают редуктор, снижающий скорость вращения (см. гл. 7). При увеличении числа полюсов скорость вращения ротора будет снижаться во столько же раз. Для того чтобы обойтись без редуктора, тихоходные многополюсные двигатели для проигрывателей строят иногда со скоростью 78 *об/мин* для обычных пластинок и 33 *об/мин* — для долгоиграющих. При этом вес и размеры двигателя, конечно, увеличиваются, но зато отсутствует шум от редуктора и снижается шум от самого двигателя при низких оборотах.

Напряжение двигателя определяется источником питания. Если двигатель постоянного тока будет работать от

батарейки карманного фонаря, то он должен быть рассчитан на напряжение 3,5 в.

Батарейка не может давать ток более 0,3 а, поэтому для питания двигателей приходится соединять несколько батареек параллельно. Если же двигатель рассчитан на напряжение более 3,5 в, то приходится прибегать к смешанному соединению батареек.

Двигатели переменного тока для движущихся моделей, питаемые от трансформатора, обычно рассчитывают на 12 в. Двигатели для настольного вентилятора и для электропроигрывателя могут питаться энергией непосредственно от осветительной сети. При этом в целях обеспечения безопасности их обмотки должны быть выполнены в точном соответствии с описанием в гл. 6, и дети дошкольного возраста не должны к ним допускаться. Осветительные сети могут иметь напряжение 127 или 220 в. Если напряжение сети в квартире неизвестно, посмотрите на стеклянную колбу электрической лампочки, на которой обозначены: мощность лампочки в ваттах и напряжение в вольтах.

Следует заметить, что двигатели очень малой мощности (до 1 вт) не могут быть выполнены для напряжения осветительной сети, так как для них потребовались бы такие тонкие обмоточные провода, которых нет в продаже. С понижением напряжения увеличивается ток двигателя, а следовательно, и диаметры проводов.

### 5-6. Расчет двигателей постоянного тока

Расчет начинаем с двигателей постоянного тока, так как расчет их проще и понятнее, чем двигателей переменного тока. Здесь дано подробное объяснение всех расчетных величин, которые потом будут встречаться и в двигателях переменного тока. Расчет приведен для двухполюсных двигателей с последовательным возбуждением, так как они применяются для приведения в движение различных моделей.

Зная мощность, скорость вращения и напряжение, можно определить все размеры двигателя.

Расчет двигателя начинается с определения двух главных размеров, которыми являются диаметр и длина якоря. Эти размеры входят в формулу

$$D^2l = \frac{P_a 10^9}{1,1ASBn} [см^3], \quad (5-1)$$

где  $D$  — диаметр якоря,  $см$ ;

$l$  — длина якоря,  $см$ ;

$P_a$  — расчетная мощность,  $вт$ ;

$AS$  — линейная нагрузка якоря,  $а/см$ ;

$B$  — магнитная индукция в воздушном зазоре,  $гс$ ;

$n$  — номинальная скорость вращения,  $об/мин$ .

Левая часть формулы пропорциональна объему якоря. Действительно, если ее умножить на  $\pi$  и разделить на 4, то получится объем цилиндра, каким и является якорь двигателя.

Как видно из правой части формулы, объем якоря пропорционален мощности двигателя  $P_a$  и обратно пропорционален скорости вращения  $n$ . Отсюда можно сделать вывод, что чем большую скорость вращения имеет якорь двигателя, тем меньше получаются его размеры, а от размеров якоря зависят размеры и остальных частей двигателя.

Расчетная мощность двигателя выражается формулой

$$P_a = EI = P \frac{1 + 2\eta}{3\eta} [вт], \quad (5-2)$$

где  $E$  — э. д. с., наводимая в обмотке якоря при вращении его в магнитном поле;

$I$  — ток, потребляемый двигателем от источника,  $а$ ;

$P$  — номинальная мощность двигателя,  $вт$ ;

$\eta$  — к. п. д. двигателя, значение которого можно взять по кривой рис. 5-3; как видно на кривой, значения к. п. д. сильно снижаются при уменьшении мощности двигателя.

Численное значение расчетной мощности получаем, решая правую часть формулы (5-2), в которой численные значения всех величин известны. Расчетная мощность всегда больше номинальной мощности двигателя, так как часть подведенной от источника мощности затрачивается на потери в самом двигателе

Ток, потребляемый двигателем:

$$I = \frac{P}{U\eta} [а], \quad (5-3)$$

где  $P$  — номинальная мощность,  $вт$ ;

$U$  — номинальное напряжение,  $в$ ;

$\eta$  — к. п. д. по кривой рис. 5-3.

Теперь можно определить и величину  $E$ , которая будет нужна в дальнейшем:

$$E = \frac{Pa}{I} [\text{в}]. \quad (5-4)$$

Линейная нагрузка якоря выражается следующей формулой:

$$AS = \frac{NI}{2\pi D} [a/\text{см}]. \quad (5-5)$$

В этой формуле  $N$  обозначает число проводников обмотки якоря, множитель 2 в знаменателе показывает, что

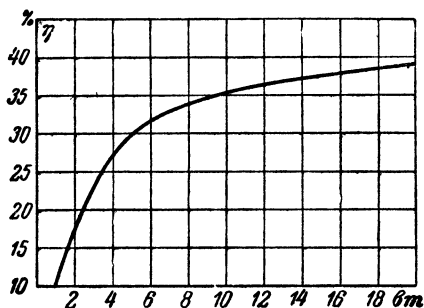


Рис. 5-3. График для определения к. п. д.

общий ток якоря  $I$  от коллекторной пластины разветвляется между двумя проводниками обмотки и через каждый проводник протекает только половина тока. Произведение  $\pi D$  выражает длину окружности якоря. Таким образом, линейная нагрузка показывает, сколько ампер-проводов приходится на 1 см длины окружности якоря.

Линейную нагрузку  $AS$  и магнитную индукцию в воздушном зазоре  $B$  называют электромагнитными нагрузками. Они показывают, насколько сильно нагружен двигатель в электрическом и магнитном отношениях. Из формулы (5-1) видно, что чем больше произведение  $AS \cdot B$ , тем меньше будут размеры якоря. Но значения  $AS$  и  $B$  не должны превосходить определенного предела, так как иначе двигатель будет сильно нагреваться при работе.

Однако нагрев двигателя зависит не только от электромагнитных нагрузок, но и от времени его работы. Некоторые двигатели работают длительное время без остановки, например двигатели вентиляторов. Другие двигатели работают с перерывами, во время которых они успевают

остыть, например двигатели подъемных кранов, электропроигрывателей, пылесосов. Работа двигателя с перерывами называется повторно-кратковременной. Это значит, что двигатель включается на короткое время, затем происходит перерыв и двигатель снова включается.

Выбор величины линейной нагрузки и магнитной индукции производится по кривым рис. 5-4 и 5-5, где по горизонтальной оси отложены номинальные мощности в милливаттах, деленные на номинальные скорости вращения. На каждом рисунке две кривые: верхняя применяется для двигателей с повторно-кратковременной рабо-

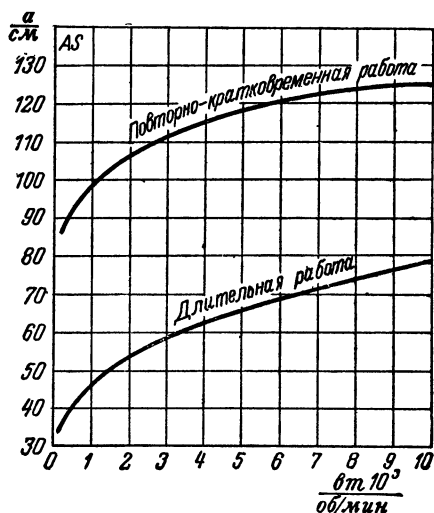


Рис. 5-4. График для определения линейной нагрузки.

той, нижняя для двигателей с длительной непрерывной работой.

Теперь можно высчитать правую часть формулы (5-1), левая часть которой содержит два неизвестных  $D$  и  $l$ .

В этом уравнении диаметр и длина якоря связаны между собой определенным отношением. Обозначим отношение  $l : D = k$ . Значение  $k$  для малых двигателей находится в пределах от 0,7 до 1,2. Если надо получить двигатель с меньшей длиной, но с большим диаметром, то берем  $k=0,7$ . Наоборот, если двигатель должен поместиться в трубу небольшого диаметра, то выбираем  $k=1,2$ . Если размеры двигателя не связаны какими-либо условия-



ми, то обычно берут  $k=1$ . Вводя отношение  $l:D=k$  в левую часть формулы, мы освобождаемся от одного неизвестного  $l$ , и формула (5-1) получает такой вид:

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_a 10^9}{k l, 1 ASBn}} \text{ [см]}. \quad (5-6)$$

Определив значение  $D$ , находим значение

$$l = Dk \text{ [см]}.$$

Таким образом, определены главные размеры двигателя.

Теперь займемся расчетом обмотки якоря. Для этого сначала надо определить магнитный поток двигателя. Если магнитную индукцию в воздушном зазоре умножить

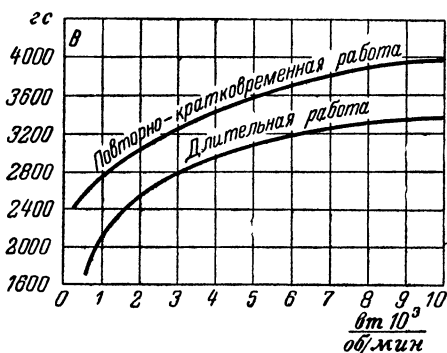


Рис. 5-5. График для определения индукции в воздушном зазоре.

на площадь, через которую силовые линии входят в якорь, то получим поток двигателя, который выражается в максвеллах и обозначается греческой буквой  $\Phi$  (фи)

$$\Phi = B a \tau l \text{ [мкс]}. \quad (5-7)$$

В этой формуле греческой буквой  $\tau$  (тау) обозначено полюсное деление, т. е. часть окружности якоря, приходящаяся на один полюс. В двухполюсном двигателе полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2} \text{ [см]}.$$

Греческой буквой  $\alpha$  (альфа) обозначено, какую часть полюсного деления занимает дуга полюса  $b_m$  (рис. 5-9). Обычно принимают  $\alpha = 0,65$ . Таким образом, произведение  $\alpha \tau l$  дает площадь полюса, обращенную в сторону якоря.

Число проводников якоря определяется по следующей формуле:

$$N = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{\Phi n}. \quad (5-8)$$

Число проводников не может быть любым целым числом. Проводники обмотки якоря должны быть поровну распределены по пазам якоря. Число пазов  $Z$  определяют из следующего соотношения:

$$Z = 3D.$$

Рекомендуется брать ближайшее нечетное число. Теперь определим окончательно число проводников обмотки, чтобы в каждом пазу было четное число проводников:

$$N_z = \frac{N}{Z}.$$

Число проводников в пазу должно быть четным, чтобы можно было наматывать обмотку в два слоя. Выбор числа пазов и числа проводников будет ясен из числового примера расчета двигателя.

Сечение провода для обмотки якоря можно определить, разделив ток в проводнике на плотность тока. Плотность тока показывает, сколько ампер протекает через каждый квадратный миллиметр сечения провода и обозначается греческой буквой  $\Delta$  (дельта). Таким образом, сечение провода

$$S = \frac{I}{2\Delta} \text{ [мм}^2\text{]}.$$

Для выбора плотности тока можно руководствоваться кривой  $I$  рис. 5-6.

Это сечение провода  $s$  является предварительным. Во втором столбце табл. 5-1 нужно найти сечение стандартного провода, которое наиболее близко подходит к вычисленному. В первом столбце этой же таблицы найдем и диаметр провода  $d$ .

Отсутствие провода требуемого диаметра не может мешать изготовлению двигателя, так как имеются большие возможности для замены провода. Прежде всего один провод можно заменить двумя проводами, если сечение этих проводов будет такое же, как у заменяемого провода. Сечение провода зависит от квадрата диаметра, значит у провода сечением в 2 раза меньше диаметр будет в  $\sqrt{2}$  раз меньше. Например, вместо провода диаметром 0,29

можно взять два провода диаметром 0,2 мм. При этом плотность тока почти не изменится, но число проводов в пазу возрастает в 2 раза. Чтобы заменить один провод тремя параллельными, надо, чтобы диаметр каждого из этих проводов был в  $\sqrt{3}$  раз меньше диаметра заменяемого провода.

Если заменяющий провод немного меньше или больше требуемого, то можно обмотать им якорь, сохранив рас-

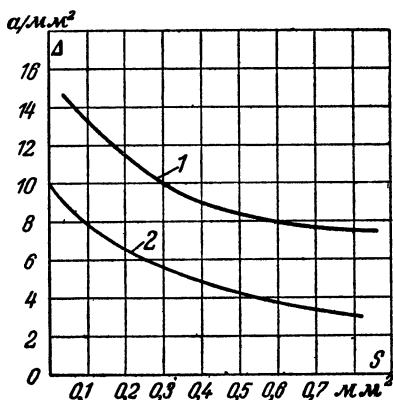


Рис. 5-6. График для определения плотности тока.

1 — обмотка якоря; 2 — обмотка возбуждения.

четное число проводников в пазу. Надо только помнить, что при уменьшении диаметра провода возрастет плотность тока, и двигатель будет требовать более частых остановок для охлаждения. Если же заменить провод более толстым, то требуется проверить, разместятся ли проводники в пазу.

Выбрав окончательно диаметр провода, надо по табл. 5-2 определить диаметр изолированного провода, прибавив двустороннюю толщину изоляции  $d_{u3} = d + \delta_{u3}$  [мм].

Теперь можно приступить к определению размера паза. Сечение паза, необходимое для размещения проводников обмотки, можно вычислить по формуле

$$S = \frac{d_{u3}^2 N_z}{k_3} \quad [\text{мм}^2]. \quad (5-9)$$

В знаменателе формулы коэффициент  $k_3$  носит название коэффициента заполнения паза. Он показывает, насколько плотно проводники заполняют паз. Чем меньше коэффициент заполнения, тем больше должна быть площадь паза. При расчетах можно брать коэффициент заполнения  $k_3 = 0,6-0,7$ .

При изготовлении якоря сечение паза должно быть больше, чем по формуле (5-9), так как в нем должны еще

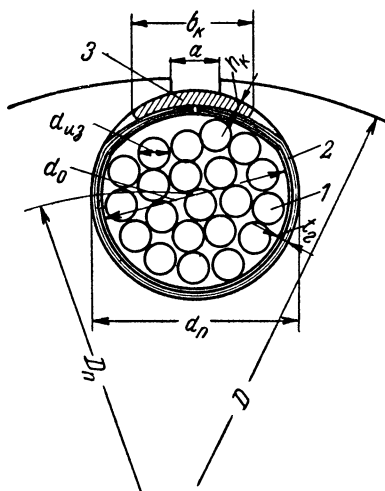


Рис. 5-7. Разрез паза с обмоткой.

1 — проводник; 2 — гильза; 3 — клин.

поместиться изоляционная гильза 2 толщиной 0,2 мм и клин 3 из картона толщиной 0,3 мм (рис. 5-7). Площадь, занимаемую гильзой, можно определить по формуле

$$S_2 = p t_2 \text{ [мм}^2\text{]}, \quad (5-10)$$

в которой  $p$  — периметр паза, мм;

$t_2$  — толщина гильзы, мм.

Площадь клина можно определить по формуле

$$S_k = h_k b_k \text{ [мм}^2\text{]}, \quad (5-11)$$

где  $h_k$  — толщина клина;

$b_k$  — ширина клина.

Таким образом, полное сечение паза должно быть равно:

$$S_n = S + S_2 + S_k.$$

В двигателях заводского изготовления пазы имеют сложную трапециевидальную (рис. 5-8, а) или грушевидную (рис. 5-8, б) форму, чтобы в них могло поместиться больше проводников обмотки. В самодельных двигателях легче всего протвердить круглые пазы в спрессованном сердечнике яко-

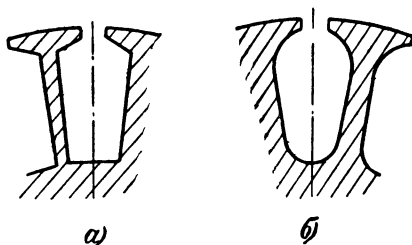


Рис. 5-8. Формы пазов якоря.  
а — трапециевидальный; б — грушевидный.

ря (см. рис. 5-7). Диаметр паза определится по его полному сечению:

$$d_n = \sqrt{\frac{4S_n}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{S_n}{\pi}} \text{ [мм]}.$$

Определив размер паза, можно узнать толщину зубца. По рис. 5-7 толщину зубца можно рассчитать следующим образом:

Сначала найдем диаметр окружности  $D_n$ , на которой будут лежать центры пазов. Для этого надо из диаметра якоря вычесть диаметр паза  $+1$  мм:

$$D_n = D - (d_n + 1).$$

Расстояние между соседними пазами будет:

$$t = \frac{\pi D_n}{Z} \text{ [мм]},$$

а толщина зубца

$$b_z = t - d_n \text{ [мм]}. \quad (5-12)$$

Толщина зубца в узком месте должна быть не меньше 2 мм. Если этого не получается, надо выпиливать пазы сложной формы (рис. 5-8, а или 5-8, б). При невозможности сделать пазы сложной формы надо увеличить диаметр якоря с таким расчетом, чтобы получить зубцы толщиной не менее 2 мм. Прорезь паза  $a$  должна быть на 1 мм больше диаметра провода  $d_{\text{уз}}$ .

Число коллекторных пластин в двигателях на низкое напряжение (12 в и ниже) берется равным числу пазов. Укладка проводников обмотки якоря и соединение с коллектором описаны в гл. 6.

Сечение угольной или графитовой щетки выбирается по формуле

$$S_{щ} = \frac{I}{\Delta_{щ}}, \quad (5-13)$$

где  $\Delta_{щ}$  — плотность тока под щеткой,  $a/cm^2$ .

На этом расчет якоря заканчивается.

Переходим к расчету магнитной системы. Для самодельного двигателя проще всего применить магнитную систему открытого типа (рис. 4-2). При расчете прежде всего определяют воздушный зазор  $\delta$  между якорем и полюсами. В машинах постоянного тока берут увеличенный зазор. В этих машинах магнитное поле создается катушками полюсов. Но сам якорь также представляет собой электромагнит, так как он собран из стальных листов, а по его обмотке протекает ток. Якорь также создает магнитное поле, которое направлено против поля полюсов и стремится его ослабить. Увеличенный воздушный зазор уменьшает размагничивающее действие магнитного поля якоря.

Воздушный зазор определяется по формуле

$$\delta = \frac{0,45\tau AS}{B} [см]. \quad (5-14)$$

Угол полюсной дуги можно найти по значению  $\alpha = 0,65$ . Половина окружности занимает  $180^\circ$ ; следовательно, угол  $\alpha_m = 180 \cdot 0,65 = 117^\circ$ , округляем до  $120^\circ$ .

Размеры магнитной системы рассчитывают по магнитным индукциям. При расчете магнитной системы полюсов и станины величину магнитного потока увеличивают на 10%, так как часть силовых линий замыкается между сторонами станины, минуя якорь. Поэтому магнитный поток полюсов и станины:

$$\Phi_{ст} = 1,1\Phi [мкс].$$

Индукцию в станине принимают  $B_{ст} = 5\ 000$  гс.

Длину станины  $L_{ст}$  определяют по эскизу (рис. 5-9).

Если форма станины соответствует рис. 4-1, то поток станины  $\Phi_{ст}$  надо разделить пополам, так как он раздваивается по двум параллельным путям.

На рис. 5-9 пунктирной линией показан путь магнитного потока. Он состоит из следующих участков: два воздушных зазора, два зубца, якорь и станина. Чтобы узнать, какую н. с. должна иметь катушка возбуждения, надо рассчитать н. с. ( $I\omega$ ) для каждого из этих участков и затем все их сложить. Начнем расчет н. с. с воздушного зазора.

Намагничивающая сила воздушного зазора выражается формулой

$$I\omega_0 = 1,6\delta k_0 B [a-\delta], \quad (5-15)$$

где  $\delta$  — воздушный зазор с одной стороны якоря, см;

$k_0$  — коэффициент, учитывающий, насколько увеличивается магнитное сопротивление воздушного зазора вследствие наличия на якоре прорезей пазов; можно принять  $k_0 = 1,1$ ;

$B$  — индукция в воздушном зазоре, гс.

Для определения н. с. зубцов якоря надо знать индукцию в зубце. Толщину зубца  $b_z$

можно определить по формуле (5-12). Магнитный поток входит в зубец через часть окружности якоря, приходящуюся на один зубец. Она называется зубцовым делением и определяется по формуле

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z}. \quad (5-16)$$

Индукция в зубце будет во столько раз больше индукции в воздушном зазоре, во сколько раз толщина зубца меньше зубцового деления. Кроме того, надо учесть, что часть длины якоря занята изоляционными прослойками между листами, которые составляют около 10%. Поэтому индук-

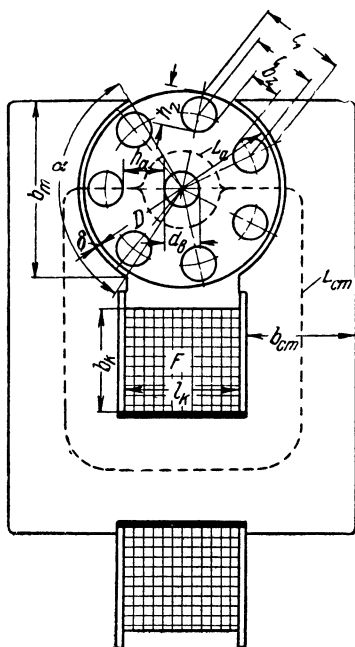


Рис. 5-9. Эскиз к расчету магнитной цепи.

ци.о в зубце можно определить по формуле

$$B_z = \frac{Bt}{b_z 0,9}. \quad (5-17)$$

Этой индукции по табл. 5-3 соответствует напряженность поля  $H_z$ . Для расчета н. с. на две высоты зубца надо  $H_z$  умножить на двойную высоту зубца

$$I\omega_z = H_z 2h_z.$$

При расчете индукции в сердечнике якоря следует учесть, что магнитный поток в нем разветвляется, и поэтому на одно сечение приходится только половина потока. Сечение сердечника якоря по рис. 5-9 равно расстоянию  $h_a$  от основания паза до вала, умноженному на длину якоря  $h_a = \frac{D}{2} - h_z - \frac{d_8}{2}$ . Надо учесть так же изоляционные прослойки между листами. Таким образом, индукция в сердечнике якоря

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a l 0,9}.$$

Этой индукции по табл. 5-3 соответствует  $H_a$ . Намагничивающая сила сердечника якоря  $I\omega_a = H L_a$ , где  $L_a$  — длина силовой линии в сердечнике согласно рис. 5-9:

$$L_a = \frac{\pi(D - 2h_z - h_a)}{2} \quad [см].$$

Как видно на рис. 5-9, у этого двигателя нет выступающих полюсов, которые слились со станиной. Поэтому расчет неподвижной части магнитопровода сводится к расчету станины.

Ширина станины определяется по заданной индукции  $B = 5000$  гс. Отсюда

$$b_{cm} = \frac{\Phi_{cm}}{5000 l 0,9} \quad [см].$$

Напряженность поля  $H_{cm}$  для индукции 5000 гс находим в табл. 5-3. При определении длины силовой линии в станине мы встречаемся с затруднением. Ведь длина боковой стороны станины зависит от толщины катушки, а ее мы еще не знаем. Поэтому возьмем толщину катушки  $b_k = 30 \delta$ , где  $\delta$  — воздушный зазор. Зависимость между толщиной катушки и зазором объясняется тем, что от величины за-



зора главным образом зависит н. с. катушки, а следовательно, и размеры катушки. Определив по эскизу длину силовой линии в станине  $L_{cm}$ , можно рассчитать н. с. для станины:

$$I\omega_{cm} = L_{cm} H_{cm}.$$

Теперь сложим н. с. всех участков:

$$I\omega_0 = I\omega_\delta + I\omega_z + I\omega_a + I\omega_{cm}.$$

Такую н. с. должна создать катушка при холостом ходе двигателя. Но при нагрузке, когда ток в якоре будет расти, появится размагничивающее действие магнитного поля якоря. Поэтому н. с. катушки должна иметь некоторый запас, который подсчитывается по формуле

$$I\omega_p = 0,15 \tau AS [a-\delta]. \quad (5-18)$$

Таким образом, н. с. катушки при нагрузке двигателя:

$$I\omega = I\omega_0 + I\omega_p.$$

Через катушку возбуждения будет протекать ток якоря, а потому число витков катушки будет  $\omega = \frac{I\omega}{I}$  витков.

Для определения сечения провода надо ток разделить на плотность тока. Она берется ниже, чем для обмотки якоря, так как витки катушки неподвижны и потому хуже охлаждаются. Плотность тока для катушки возбуждения можно проверять по кривой 2 рис. 5-6.

Сечение провода катушки

$$S = \frac{I}{\Delta} [cm^2].$$

По табл. 5-1 находим ближайшее стандартное сечение и диаметр провода. Выбрав марку провода, по табл. 5-2 находим диаметр изолированного провода.

Чтобы узнать действительную толщину катушки, надо знать площадь, занимаемую витками катушки. Ее можно определить по формуле

$$F = \frac{\omega d_{uz}^2}{k_3}. \quad (5-19)$$

Разделим площадь на длину катушки, которая на эскизе обозначена через  $l_k$ . Получим:

$$b_k = \frac{F}{l_k}.$$

Итак, по номинальным данным двигателя, которые выражаются всего тремя числами, пользуясь формулами и таблицами, мы определили все размеры двигателя, необходимые для его изготовления. Рассчитанный двигатель будет надежно работать, и его нагрев не выйдет из допустимых норм. В этом ценность расчета двигателя. Разве можно было бы «угадать» все эти размеры при изготовлении двигателя без расчетов. Вероятно, его пришлось бы несколько раз переделывать, прежде чем получится удовлетворительный результат, потратив на эти переделки в несколько раз больше времени, чем на расчет, не говоря уже об испорченных ценных материалах (обмоточный провод).

Кроме того, в процессе расчета вы получите навыки по техническим расчетам и знания по теории электрических машин.

### 5-7. Пример расчета двигателя постоянного тока

Номинальные данные двигателя:  $P = 5 \text{ вт}$ ,  $U = 12 \text{ в}$ ,  $n = 4000 \text{ об/мин}$ .

По кривой рис. 5-3 определяем к. п. д. двигателя 30%.

По формуле (5-2) определяем расчетную мощность двигателя:

$$P_a = 5 \frac{1 + 2 \cdot 0,3}{3 \cdot 0,3} = 5 \frac{1,6}{0,9} = 8,9 \text{ вт}.$$

Для нахождения значений  $AS$  и  $B$  по кривым рис. 5-4 и 5-5 вычислим отношение мощности двигателя, выраженной в милливаттах к скорости вращения в оборотах в минуту. Для данного двигателя это отношение составляет  $5000 : 4000 = 1,25$ . Отложив это число на горизонтальной оси рис. 5-4, находим значение линейной нагрузки при длительной работе двигателя  $AS = 50 \text{ а/см}$ . Аналогично по рис. 5-5 находим значение индукции в воздушном зазоре  $B = 2200 \text{ гс}$ . Примем отношение  $l : D = 1$ . Подставим числовые значения расчетных величин в формулу (5-6), найдем диаметр якоря:

$$D = \sqrt[3]{\frac{8,9 \cdot 10^9}{1,1 \cdot 50 \cdot 2200 \cdot 4000}} = \sqrt[3]{18,4} = 2,6 \text{ см}.$$

При  $k = 1$  длина якоря:

$$l = 2,6 \cdot 1 = 2,6 \text{ см}.$$

Ток якоря по формуле (5-3)

$$I = \frac{5}{0,3 \cdot 12} = 1,4 \text{ а}.$$

Электродвижущая сила обмотки якоря по формуле (5-4)

$$E = \frac{8,9}{1,4} = 6,3 \text{ в}.$$

Полусное деление якоря

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 2,6}{2} = 4,1 \text{ см}.$$

Магнитный поток по формуле (5-7)

$$\Phi = 0,65 \cdot 4,1 \cdot 2,6 \cdot 2200 = 15200 \text{ мккс.}$$

Число проводников обмотки якоря по формуле (5-8)

$$N = \frac{6,3 \cdot 60 \cdot 10^8}{15200 \cdot 4000} = 620.$$

Число пазов якоря

$$z = 3 \cdot 2,6 = 7,8.$$

Округляем до ближайшего нечетного числа  $z = 7$ .

Число проводников в пазу

$$N_z = \frac{620}{7} = 88.$$

Это число делится на 2, поэтому округлять его не требуется.

Сечение проводника обмотки якоря при  $\Delta = 10 \text{ а/мм}^2$

$$s = \frac{1,4}{2 \cdot 10} = 0,07 \text{ мм}^2.$$

Согласно кривой  $I$  (рис. 5-6) при сечении  $0,07 \text{ мм}^2$  надо взять плотность тока до  $8 \text{ а/мм}^2$ . По табл. 5-1 определяем сечение провода  $s = 0,085 \text{ мм}^2$  и  $d = 0,33 \text{ мм}$ .

Выбираем провод марки ПЭЛ; толщина изоляции по табл. 5-2 составляет  $0,04 \text{ мм}$ . Следовательно, диаметр изолированного провода будет:

$$d_{из} = 0,33 + 0,04 = 0,37 \text{ мм.}$$

Сечение паза по формуле (5-9)

$$S = \frac{d_{из}^2 \cdot 88}{0,7} = 17,2 \text{ мм}^2.$$

Диаметр круга, занятого проводниками обмотки:

$$d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot 17,2}{3,14}} = \sqrt{22} = 4,7 \text{ мм.}$$

Периметр изоляционной гильзы

$$p = 3,14 \cdot 4,7 = 14,7 \text{ мм.}$$

Площадь паза, занимаемая гильзой, по формуле (5-10):

$$S_z = 14,7 \cdot 0,2 = 2,9 \text{ мм}^2.$$

Площадь паза, занимаемая клином, по формуле (5-11):

$$S_k = 0,3 \cdot 3 = 0,9 \text{ мм}^2.$$

Полное сечение паза

$$S_n = S + S_z + S_k = 17,2 + 2,9 + 0,9 = 21 \text{ мм}^2.$$

Диаметр паза

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot 21}{3,14}} = \sqrt{26,7} = 5,2 \text{ мм.}$$

Диаметр окружности, на которой расположены центры пазов:

$$D_n = 26 - [5,2 + 1] = 19,8 \text{ мм.}$$

Расстояние между соседними пазами

$$t = \frac{3,14 \cdot 19,8}{7} = 8,9 \text{ мм.}$$

Толщина зубца в узком месте  $b_z = 8,9 - 5,2 = 3,7 \text{ мм.}$

Прорезь паза

$$a = 0,37 + 1 = 1,37 \text{ мм.}$$

Число коллекторных пластин  $K = 7.$

Сечение щетки

$$S_{щ} = \frac{1,4}{6} = 0,23 \text{ см}^2.$$

Можно взять квадратную щетку с размерами сторон  $5 \text{ мм} \times 5 \text{ мм.}$

Воздушный зазор между якорем и полюсом по формуле (5-14)

$$\delta = \frac{0,45 \cdot 4,1 \cdot 50}{2 \cdot 200} = 0,04 \text{ см} = 0,4 \text{ мм.}$$

Для определения н. с. катушки возбуждения проведем расчет магнитной цепи по рис. 5-9.

Намагничивающая сила воздушного зазора по формуле (5-15)

$$Iw_\delta = 1,6 \cdot 0,04 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 200 = 155 \text{ а-в.}$$

Зубцовое деление по формуле (5-16)

$$t_1 = \frac{3,14 \cdot 2,6}{7} = 1,2 \text{ см.}$$

Индукция в зубце по формуле (5-17)

$$B_z = \frac{2 \cdot 200 \cdot 1,2}{0,37 \cdot 0,9} = 8 \cdot 000 \text{ гс.}$$

Напряженность поля  $H_z$  для зубца по табл. 5-3

$$H_z = 4,05.$$

Намагничивающая сила зубцов

$$Iw_z = 4,05 \cdot 2 \cdot 0,57 = 4,6 \text{ а-в.}$$

Индукция в сердечнике якоря

$$B_\alpha = \frac{15 \cdot 200}{2 \cdot 0,5 \cdot 2,6 \cdot 0,9} = 6 \cdot 500 \text{ гс.}$$

По табл. 5-3 при этой индукции  $H_\alpha = 3,2.$

Намагничивающая сила для сердечника якоря

$$Iw = 3,2 \cdot 1,5 = 4,8 \text{ а-в.}$$

Теперь переходим к расчету н. с. для неподвижных частей магнитопровода.

Магнитный поток станины

$$\Phi_{см} = 1,1 \cdot 15 \cdot 200 = 16 \cdot 700 \text{ макс.}$$

Примем индукцию в станине 5 000 гс. Тогда ширина станины определится:

$$b_{cm} = \frac{16\,700}{5\,000 \cdot 2,6 \cdot 0,9} = 1,4 \text{ см.}$$

Ширина станины против центра якоря имеет меньшую величину, но через это сечение проходит только половина потока.

Индукции 5 000 гс по табл. 5-3 соответствует значение  $H_{cm} = 2,5$ .

Для определения длины силовой линии в станине примем толщину катушки  $b_k = 30$   $\delta = 30 \cdot 0,04 = 1,2$  см. По рис. 5-9 определяем среднюю длину силовой линии  $L_{cm} = 4,5$  см.

Намагничивающая сила станины

$$I\omega_{cm} = 2,5 \cdot 4,5 = 11 \text{ а-в.}$$

Теперь сложим н. с. всех участков

$$I\omega_o = 155 + 4,6 + 4,8 + 11 = 175 \text{ а-в.}$$

Размагничивающая сила магнитного поля по формуле 5-18

$$I\omega_p = 0,15 \cdot 4,1 \cdot 50 = 31 \text{ а-в.}$$

Намагничивающая сила катушки при нагрузке двигателя

$$I\omega = 175 + 31 = 206 \text{ а-в.}$$

Число витков катушки

$$\omega = \frac{206}{1,4} = 147 \text{ витков.}$$

Примем плотность тока в катушке равной 5 а/мм<sup>2</sup>.

Сечение провода

$$s = \frac{1,4}{5} = 0,28 \text{ мм}^2.$$

Это соответствует плотности тока по кривой 2 (рис. 5-6).

По табл. 5-1 находим ближайшее сечение стандартного провода  $s = 0,273$  мм<sup>2</sup> и диаметр провода  $d = 0,59$  мм.

Для провода марки ПЭЛ толщина изоляции по табл. 5-2 равна 0,05 мм. Диаметр изолированного провода  $d_{из} = 0,59 + 0,05 = 0,64$  мм.

Площадь, занимаемую витками катушки, определим по формуле (5-19):

$$F = \frac{147 \cdot 0,64^2}{0,7} = 86 \text{ мм}^2.$$

Длина катушки по рис. 5-9 равна  $l_k = 12$  мм.

Следовательно, действительная толщина катушки будет:

$$b_k = \frac{86}{12} = 7,2 \text{ мм.}$$

При расчете магнитной цепи принималась толщина катушки 12 мм.

Таким образом, н. с. станины рассчитана с некоторым запасом. При отсутствии провода диаметром 0,59 мм можно намотать катушку проводом 0,33, который применяется для обмотки якоря. Намотку катушки надо делать в три параллельных провода.

## 5-8. Расчет коллекторного двигателя переменного тока

Двигатель, рассчитанный для постоянного тока, будет работать и на переменном токе, если станина выполнена из тонких листов, изолированных друг от друга. Однако мощность и скорость вращения двигателя при переходе на питание переменным током изменяются. Поэтому двигатель, предназначенный для питания переменным током, нужно рассчитывать несколько иначе, чем двигатель постоянного тока.

Номинальные данные: мощность  $P$  [вт], напряжение  $U$  [в], скорость вращения  $n$  [об/мин].

Расчетная мощность  $P_a = E \cdot I$

$$I = \frac{1 + \eta}{2\eta} P. \quad (5-20)$$

Значение  $\eta$  можно брать по кривой рис. 5-3.

Диаметр якоря

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_a \cdot 10^9}{k_{1,3} AS B n}} \text{ [см]}. \quad (5-21)$$

Значения  $AS$  и  $B$  можно брать по кривым рис. 5-4 и 5-5.

Длина якоря

$$l = kD.$$

Ток якоря при нагрузке

$$I = \frac{P}{\eta U \cos \varphi}. \quad (5-22)$$

При скорости вращения 3 000 об/мин  $\cos \varphi = 0,65$ , а при скорости вращения 5 000 об/мин  $\cos \varphi = 0,75$ .

Электродвижущая сила обмотки якоря

$$E = \frac{P_a}{I}. \quad (5-23)$$

Магнитный поток  $\Phi$  рассчитывается по формуле (5-7).

Число проводников обмотки якоря определяется по формуле

$$N = \frac{60 \sqrt{2} E 10^8}{\Phi n}. \quad (5-24)$$

Расчет обмотки якоря и размеров паза производится аналогично двигателям постоянного тока.

Число витков обмотки возбуждения берется из соотношения

$$\omega = 0,15 - 0,2N, \quad (5-25)$$

где  $N$  — число проводников обмотки якоря.

Таким образом, нет необходимости рассчитывать магнитную цепь.

### 5-9. Расчет однофазных асинхронных двигателей

Как было сказано в гл. 4, магнитное поле однофазного двигателя можно разложить на прямое и обратное поля, вращающиеся в противоположные стороны. Ротор пересекает эти поля с разными скоростями, поэтому расчет однофазных двигателей содержит сложные формулы, основанные на высшей математике. В этой главе приводятся упрощенные методы расчета однофазных асинхронных двигателей, которые дают достаточную точность для изготовления самодельных двигателей.

В начале расчета задаемся номинальными данными двигателя. Мощность  $P$  [вт], напряжение  $U$  [в] и скорость вращения  $n$  [об/мин]. Здесь приводятся формулы и пример расчета двухполюсных двигателей с синхронной скоростью вращения 3000 об/мин, работающих от сети переменного тока 127 в. Учитывая падение напряжения в линии, расчет ведут на напряжение 120 в.

Расчетная мощность двигателя определяется по формуле

$$P_a = \frac{P}{\eta \cos \varphi} [\text{ва}]. \quad (5-26)$$

Произведение  $\eta \cos \varphi$  для однофазных двигателей с отключаемой пусковой обмоткой берется по кривой рис. 5-10.

Внешний диаметр статора

$$D_a = \sqrt[3]{14P_a} [\text{см}]. \quad (5-27)$$

Внутренний диаметр статора

$$D = 0,55D_a [\text{см}]. \quad (5-28)$$

Длина статора  $l = D$  [см].

Полюсное деление

$$\tau = \frac{3,14D}{2} [\text{см}].$$

Магнитную индукцию в воздушном зазоре  $B$  выбираем по кривой рис. 5-5.

Магнитный поток определяем по формуле (5-7):

$$\Phi = \alpha B \tau l \text{ [мкс]}.$$

Для однофазных двигателей значение  $\alpha$  можно брать равным 0,72.

Число пазов статора для двигателей с отключаемой пусковой обмоткой выбирают кратным 6. Для двигателей мощностью до 10 *вт* можно взять 12 пазов статора. Из них восемь пазов будут заняты рабочей обмоткой, а четыре — пусковой. Для двигателей большей мощности берут 18 пазов статора. Из них 12 пазов занимает рабочая обмотка и шесть пазов — пусковая обмотка.

Число витков рабочей обмотки

$$\omega_p = \frac{U 10^6}{2,5 \cdot \Phi} \text{ [витков]}. \quad (5-29)$$

Число проводников в пазу рабочей обмотки

$$N_z = \frac{2\omega_p}{z_p}, \quad (5-30)$$

где  $z_p$  — число пазов, занимаемых рабочей обмоткой.

Ток в рабочей обмотке

$$I = \frac{P_a}{U} [a]. \quad (5-31)$$

Сечение проводника рабочей обмотки

$$S = \frac{I}{\Delta} \text{ [мм}^2\text{]}.$$

Диаметр провода и толщину изоляции берем по табл. 5-1 и 5-2.

Размеры пазов определяют аналогично расчету пазов двигателей постоянного тока.

Пусковая обмотка занимает  $1/3$  пазов статора. Число витков пусковой обмотки зависит от того, какой элемент включается при пуске последовательно с пусковой обмоткой.

Если в качестве пускового элемента служит активное сопротивление, то число витков пусковой обмотки берут в 3—4 раза меньше числа витков рабочей обмотки. Но она занимает в 2 раза меньше пазов. Следовательно, в каждом пазу будет в 1,5—2 раза меньше проводников, чем



в пазу рабочей обмотки. Диаметр провода для пусковой обмотки можно взять меньше, чем для рабочей обмотки, так как пусковая обмотка включается на короткой промежуток времени. Однако при изготовлении самодельного двигателя, чтобы не затруднять себя подысканием двух размеров провода, можно намотать пусковую обмотку тем же проводом, что и рабочую.

Если в качестве пускового элемента применяется конденсатор, то число витков пусковой обмотки берут равным числу витков рабочей обмотки. А так как она занимает в 2 раза меньше пазов, то в каждом пазу пусковой обмотки будет в 2 раза больше проводников, чем в пазу рабочей обмотки. Поэтому сечение провода пусковой обмотки надо взять в 2 раза меньше.

Схема обмотки и порядок укладки ее в пазы показаны в § 6-14 и на рис. 6-25.

Число пазов ротора выбирают в зависимости от числа пазов статора. При 12 пазах статора можно взять девять пазов ротора, а при 18 пазах статора — 15 пазов ротора.

Диаметр паза ротора выбирается из расчета, чтобы общее сечение стержней ротора было в 1,5—2 раза больше общего сечения проводников рабочей обмотки статора. В пазы ротора забивают медные стержни, которые припаиваются к замыкающим кольцам на торцах ротора. Сечение замыкающего кольца должно быть примерно втрое больше сечения стержня.

Пусковой момент двигателя зависит от сопротивления обмотки ротора. Поэтому для двигателей с большим пусковым моментом следует стержни ротора делать из латуни или бронзы.

Воздушный зазор между статором и ротором в асинхронных двигателях следует брать по возможности меньшим. Чем больше зазор, тем больший ток потребуется для создания магнитного потока.

В двигателях заводского изготовления зазор берут 0,25 мм на сторону. В самодельных двигателях при таком малом зазоре возможно задевание ротора за статор. Поэтому зазор приходится брать 0,3 или даже 0,4 мм.

Определение активного сопротивления или емкости конденсатора, применяемых в качестве пусковых элементов, производится по очень сложным формулам. Поэтому рекомендуется подобрать эти величины опытным путем при испытаниях изготовленного двигателя.

По опыту изготовленных двигателей активное пусковое

сопротивление примерно вдвое больше сопротивления пусковой обмотки. Сопротивление пусковой обмотки можно определить следующим образом.

Средняя длина витка пусковой обмотки приблизительно равна четырехкратной длине статора. Развернутую длину обмотки можно узнать, умножив длину среднего витка на число витков. Сопротивление обмотки можно определить по табл. 5-1, в которой указано сопротивление 100 м провода.

Емкость пускового конденсатора для двигателя при напряжении 120 в должна быть порядка 3—10 микрофарад. Следует иметь в виду, что на зажимах конденсатора образуется напряжение, значительно превосходящее напряжение осветительной сети. Поэтому при конденсаторном пуске двигателя надо принимать меры предосторожности. Зажимы конденсатора нельзя оставлять открытыми. Конденсаторы надо выбирать на тройное напряжение двигателя во избежание их пробоя.

Конденсаторы целесообразно применять только для двигателей, работающих от осветительной сети. При понижении напряжения необходимая емкость конденсатора повышается квадратично. Поэтому для двигателей напряжением 12 в пришлось бы взять конденсаторы огромной емкости.

### 5-10. Пример расчета однофазного асинхронного двигателя

Номинальные данные: мощность 3 вт, напряжение 120 в, скорость вращения (синхронная) 3 000 об/мин, работа двигателя повторно-кратковременная.

По кривой рис. 5-10 произведение  $\eta \cos \varphi = 0,25$ .

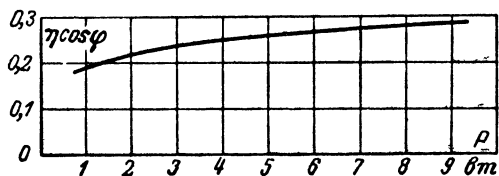


Рис. 5-10. График для определения произведения  $\eta \cos \varphi$ .

Расчетная мощность двигателя определяется по формуле (5-26):

$$P_a = \frac{3}{0,25} = 12 \text{ в.а.}$$

Наружный диаметр статора определяется по формуле (5-27):

$$D_a = \sqrt[3]{14 \cdot 12} = 5,5 \text{ см.}$$

Для упрощения изготовления возьмем форму статора в виде квадрата, описанного около наружного диаметра (рис. 5-11).

Внутренний диаметр статора определяется по формуле (5-28):

$$D = 0,55 \cdot 0,55 = 3 \text{ см.}$$

Длина статора  $l = 3 \text{ см.}$

Полюсное деление

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 3}{2} = 4,7 \text{ см.}$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре по верхней кривой рис. 5-5 должна быть взята 2 800 гс. Однако, учитывая, что при квад-

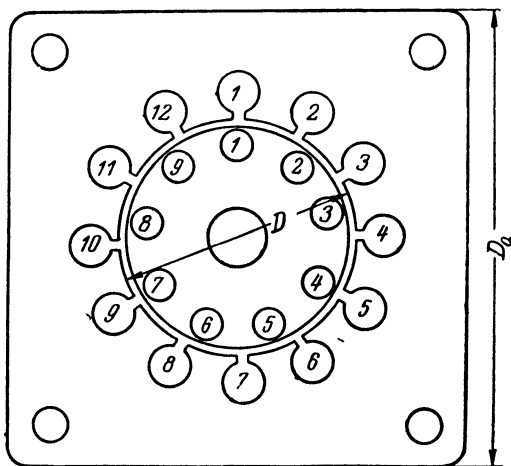


Рис. 5-11. Однофазный асинхронный двигатель.

ратной форме статора его магнитное сечение увеличивается по сравнению с круглым статором, возьмем увеличенную индукцию  $B = 4\,000 \text{ гс.}$

Магнитный поток

$$\Phi = 0,72 \cdot 4\,000 \cdot 4,7 \cdot 3 = 40\,600 \text{ мкс.}$$

Число пазов статора выбираем 12, из них для рабочей обмотки  $z_p = 8$  и для пусковой обмотки  $z_n = 4$ .

Число витков рабочей обмотки определяется по формуле (5-29):

$$w_D = \frac{120 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 40\,600} = 1\,180 \text{ витков.}$$

Число проводников в пазу рабочей обмотки определяется по формуле (5-30):

$$N_z = \frac{2 \cdot 1180}{8} = 295 \text{ проводников.}$$

Ток в рабочей обмотке определяется по формуле (5-31):

$$I = \frac{12}{120} = 0,1 \text{ а.}$$

Возьмем плотность тока  $\Delta = 5 \text{ а/мм}^2$ .

Сечение провода

$$s = \frac{0,1}{5} = 0,02 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5-1 этому сечению соответствует диаметр провода 0,16 мм. Возьмем провод марки ПЭЛ, для которого двусторонняя толщина изоляции по табл. 5-2 составляет 0,02 мм.

Диаметр изолированного провода

$$d_{из} = 0,16 + 0,02 = 0,18 \text{ мм.}$$

Ввиду большого числа проводников в пазу примем коэффициент заполнения паза  $k_3 = 0,5$ .

Площадь-паза, занимаемая проводниками обмотки, определяется по формуле (5-9):

$$s = \frac{0,18^2 \cdot 295}{0,5} = 19 \text{ мм}^2.$$

Диаметр круга, занятого проводниками обмотки:

$$d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot 19}{3,14}} = 4,9 \text{ мм.}$$

Периметр изоляционной гильзы

$$p = 3,14 \cdot 4,9 = 15,4 \text{ мм.}$$

Площадь паза, занимаемая гильзой, определяется по формуле (5-10):

$$S_z = 15,4 \cdot 0,2 = 3,1 \text{ мм}^2.$$

Площадь паза, занимаемая клином, определяется по формуле (5-11):

$$S_k = 0,3 \cdot 3 = 0,9 \text{ мм}^2.$$

Полное сечение паза определяется по формуле (5-18):

$$S = 19 + 3,1 + 0,9 = 23 \text{ мм}^2.$$

Диаметр паза, определяемый по формуле (5-19):

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot 23}{3,14}} = 5,4 \text{ мм,}$$

округляем до 5,5 мм.

Диаметр окружности, на которой расположены центры пазов:

$$D_n = 30 + (5,5 + 1) = 36,5 \text{ мм.}$$

Расстояние между соседними пазами:

$$t = \frac{3,14 \cdot 36,5}{12} = 9,5 \text{ мм.}$$

Толщина зубца в узком месте

$$b_z = 9,5 - 5,5 = 4 \text{ мм.}$$

Прорезь паза

$$a = 0,18 + 1 = 1,18 \text{ мм}$$

округляем до 1,2 мм.

Воздушный зазор принимаем равным 0,3 мм на сторону.

Диаметр ротора

$$D_p = 30 - 2 \cdot 0,3 = 29,4 \text{ мм.}$$

Число пазов ротора принимаем равным девяти.

Общее сечение меди в пазах рабочей обмотки статора

$$0,02 \cdot 295 \cdot 8 = 47 \text{ мм}^2.$$

Общее сечение меди в пазах ротора

$$47 \cdot 1,5 = 70,5 \text{ мм}^2.$$

Сечение стержня ротора

$$70,5 : 9 = 7,8 \text{ мм}^2.$$

Диаметр стержня ротора

$$\sqrt{\frac{4 \cdot 7,8}{3,14}} = 3,1 \text{ мм.}$$

Ближайший стандартный диаметр медной проволоки 3,05 мм.

Диаметр паза ротора с припуском на забивку стержней

$$3,05 + 0,25 = 3,3 \text{ мм.}$$

Диаметр окружности, на которой расположены центры пазов ротора:

$$29,4 - (3,3 + 1) = 25,1 \text{ мм.}$$

Расстояние между соседними пазами

$$\frac{3,14 \cdot 25,1}{9} = 8,7 \text{ мм.}$$

Толщина зубца ротора в узком месте

$$8,7 - 3,3 = 5,4 \text{ мм.}$$

Скос паза на 1 пазовое деление статора, т. е. на 30°.

## 5-11. Расчет конденсаторного двигателя

Расчет конденсаторного двигателя имеет некоторые особенности по сравнению с расчетом двигателя с пусковыми обмотками. У конденсаторного двигателя обе обмотки остаются все время включенными. Поэтому название «пусковая обмотка» здесь не применимо; обмотка, включаемая через конденсатор, называется вспомогательной и обозначается на схеме буквами  $B_1$  и  $B_2$ .

При определении расчетной мощности произведение  $\eta \cos \varphi$  для конденсаторного двигателя берут равным 0,5.

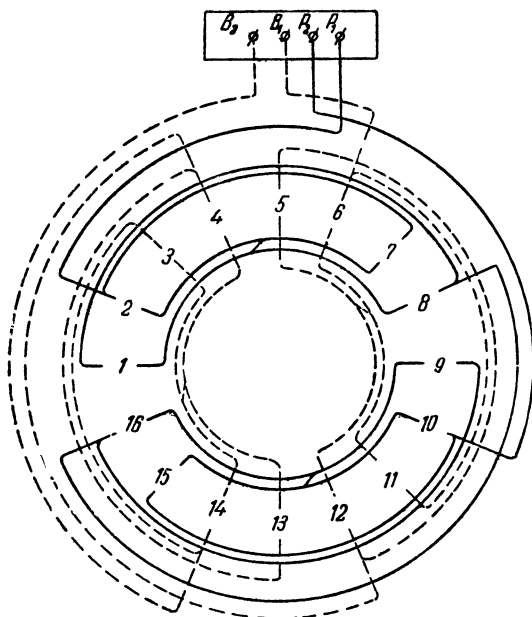


Рис. 5-12. Схема обмотки статора конденсаторного двигателя.

Для получения симметричной обмотки число пазов статора берут кратным восьми. Половину пазов занимает рабочая обмотка, а другую половину — вспомогательная обмотка. На рис. 5-12 показана схема обмотки статора конденсаторного двигателя. Сплошными линиями показаны катушки рабочей обмотки, а пунктирными — катушки вспомогательной обмотки.

Обе обмотки можно выполнить совершенно одинаковыми, т. е. из одного и того же провода и с одинаковым числом витков.

Ток в каждой из обмоток определяется по формуле

$$I = \frac{P_a}{2U}.$$

В остальном расчет конденсаторного двигателя аналогичен расчету двигателя с пусковыми обмотками.

Конденсаторный двигатель может быть выполнен как с короткозамкнутой обмоткой ротора, так и с массивным ротором. В качестве пускового элемента обычно применяется конденсатор. Емкость пускового конденсатора примерно в 3 раза больше рабочего конденсатора в цепи вспомогательной обмотки.

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### КОНСТРУКЦИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

#### 6-1. Что такое технология?

После расчета двигателя определились все его размеры, от которых зависят номинальные данные двигателя. Теперь можно приступать к его изготовлению. Но прежде необходимо продумать устройство двигателя. При одних и тех же расчетных данных формы исполнения двигателя могут быть различными. Так, например, статор двигателя может иметь замкнутую форму (см. рис. 4-1) или открытую (см. рис. 4-2). Катушки статора могут быть намотаны отдельно и затем надеты на полюса (см. рис. 4-1) или витки катушки намотаны прямо на сердечник (см. рис. 4-2). Способ изготовления катушек зависит от выбора формы статора. Таких примеров можно было бы привести очень много.

Создание различных форм двигателей называется конструированием, а сама форма исполнения называется конструкцией двигателя. На заводах формы двигателей разрабатывают конструкторы, изготавливают же двигатель рабочие в нескольких цехах: в одном точат валы, в другом штампуют и собирают листы якорей и статоров, в третьем изготавливают обмотки. Из отдельных частей в сборочном цехе собирают двигатели и пробуют, как они работают.

Таким образом, мысли конструктора должны быть переданы многим исполнителям. Это осуществляется при помощи чертежей. Чертежи выполняются для каждой детали, для комплекта соединяемых между собой деталей, которые называются сборочными узлами, и, наконец, для всего двигателя в собранном виде. В чертежах сказано все, что необходимо знать о детали: материал, из которого должна быть сделана деталь; ее размеры и точность, с какой деталь должна быть выполнена; порядок, в котором производится соединение деталей; требования к готовому двигателю.

Но для производства электродвигателей одних чертежей еще недостаточно. По одному и тому же чертежу деталь может быть изготовлена на различных станках, различными инструментами, с неодинаковой последовательностью выполнения отдельных операций. Способы изготовления деталей и узлов двигателя называются технологией. Разрабатывают технологию технологи. Они составляют на каждую деталь технологическую карту, в которой указано: на каком станке деталь надо обрабатывать; какими пользоваться инструментами и приспособлениями; с какой скоростью должна вращаться деталь при обработке и передвигаться резец, снимающий стружку; как проверить размеры детали и сколько времени требуется на ее изготовление. Кроме технологических карт, технологи-конструкторы разрабатывают специальные инструменты и приспособления, которые обеспечивают быстрое выполнение и высокое качество деталей. Эти инструменты и приспособления называются технологической оснасткой производства.

От технологии зависят два основных показателя производства: производительность труда и качество выпускаемых изделий. Если вырубать лист статора (см рис. 4-1) зубилом, то на это потребуется около получаса, и размеры листа будут неточные, кромки листа неровные и их надо будет еще опиливать напильником. А современный штамп на автоматическом прессе может в одну минуту вырубить 300 таких листов, причем все они будут иметь одинаковые размеры и кромки их будут ровными и гладкими. Если собрать статор из штампованных листов, то стенки пазов будут иметь гладкую поверхность, и изоляция проводников не может быть повреждена при укладке обмотки в пазы.

О технологии производства надо думать и при рас-



чете и при конструировании двигателя. Например, если зубцы ротора выбрать очень тонкими, то они будут ломаться; если слишком мал воздушный зазор, ротор будет при вращении задевать за статор; если взять очень большой коэффициент заполнения пазов, то обмотку будет трудно укладывать, а изоляция проводников будет повреждаться.

## 6-2. Виды производства

Способы производства одних и тех же изделий на заводах могут быть различными; они зависят от количества изготавливаемых изделий. В зависимости от этого различают три вида производств: единичное, серийное и массовое.

Единичным называется производство, на котором различные изделия изготавливаются по одному или мелкими партиями. По этому методу работают, например, ремонтные цехи, когда надо выточить один вал вместо сломавшегося.

Серийное производство характеризуется выпуском значительных партий изделий, повторяемых из месяца в месяц. Свое название этот вид производства получил от слова серия, что значит ряд изделий. Методами серийного производства изготавливаются, например, электрические машины большой мощности.

При массовом производстве изо дня в день изготавливаются одни и те же изделия в больших количествах. Примером может служить производство электрических лампочек или радиоприемников. В электромашиностроении методами массового производства изготавливаются двигатели малой мощности (микродвигатели), выпускаемые миллионами штук в год.

Чем больше количество выпускаемых изделий, тем большие возможности открываются для повышения производительности труда, т. е. количества изделий, выпускаемых одним рабочим в единицу времени, например в час или в смену. Повышение производительности труда достигается за счет специального высокопроизводительного оборудования, приспособленного для изготовления данных изделий. Такими являются, например, автоматы для изготовления электрических лампочек.

В машиностроении при массовом производстве применяются автоматические поточные линии станков. Каждый станок выполняет одну операцию обработки без участия

рабочего. Передача деталей с одного станка на другой также производится автоматически. Таким образом, заготовка, пройдя ряд операций на нескольких станках, превращается в готовую деталь. Контроль размеров детали также выполняется автоматически, причем если размеры деталей получаются неправильными, то автоматический контролер остановит всю станочную линию и подаст сигнал. Роль наладчика, обслуживающего автоматическую линию станков, заключается в наблюдении за ее работой и устранении возникающих неполадок. При массовом производстве автоматические линии охватывают целые участки производства. Так, на Первом государственном подшипниковом заводе организовано автоматическое производство некоторых типов шарикоподшипников. На заводе автомобильных поршней все операции отливки, обработки и упаковки поршней выполняются автоматически.

При серийном производстве увеличение производительности труда достигается за счет приспособлений, ускоряющих закрепление детали и позволяющих обрабатывать одновременно несколько деталей. Специальные инструменты одновременно обрабатывают несколько поверхностей. Новаторы производства разработали методы скоростной обработки деталей, основанные на повышении скорости вращения станков и увеличении стойкости режущих граней резцов.

На сборочных операциях применяются механизированные инструменты: например, закручивание гаек и болтов производится не вручную, а специальными гайковертами, приводимыми во вращение электродвигателем или воздушной турбинкой, работающей от сети сжатого воздуха. Процесс сборки разделяется на отдельные операции, причем бригады сборщиков специализируются на выполнении отдельных операций. При массовом производстве изделия в процессе сборки передаются механически по движущемуся конвейеру.

Различные способы массового производства деталей электродвигателей будут описаны далее.

### **6-3. Взаимозаменяемость деталей**

В современном производстве детали, изготовленные на разных станках, попадают в сборку и подходят одна к другой без подбора и дополнительной обработки. Это называется взаимозаменяемостью деталей. Взаимозаменяемость достигается не за счет совершенно одинаковых

размеров деталей. Это было бы невозможно, так как абсолютного совпадения размеров даже небольшого количества деталей добиться нельзя. Больше того, даже измерить с абсолютной точностью изготовленные детали было невозможно, так как даже микрометр может измерить размеры деталей только с точностью до 0,01 мм.

Взаимозаменяемость достигается за счет того, что все детали в обрабатываемой партии должны иметь отклонения размеров в пределах определенных допусков. Эти до-

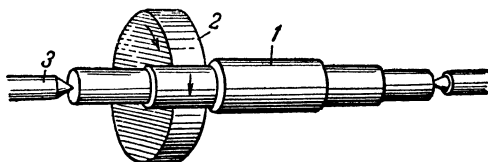


Рис. 6-1. Шлифовка вала.

1 — вал; 2 — шлифовальный круг; 3 — центры станка.

пуски довольно строгие и выражаются в сотых и тысячных долях миллиметра. Чтобы выдержать размер детали, например вала, с точностью до сотых долей миллиметра, окончательную обработку цилиндрических поверхностей производят не резцом, а вращающимся карборундовым кругом (рис. 6-1). Обрабатываемая поверхность вала 1 передвигается вдоль круга 2 и при этом вал медленно поворачивается. Шлифовальный круг при одном проходе вдоль вала снимает слой металла толщиной 2—3 мк, что дает возможность легко выдержать размеры вала в пределах допуска.

Размер вала при обработке измеряется калибром, имеющим форму двойной скобы (рис. 6-2). Расстояние между губками одной скобы равно наименьшему допускаемому диаметру вала и при измерении калибр не должен находить на вал этой стороной (рис. 6-2,б), вследствие чего она называется неприемной или непроходной. Вторая скоба калибра имеет расстояние между губками, равное наибольшему допускаемому диаметру вала, и называется проходной стороной. Она должна при измерении плотно охватывать вал (рис. 6-2,а). Если вал проверен обеими скобами, то можно считать, что его размеры находятся в пределах допусков, хотя действительный размер вала остается неизвестным.

Аналогично измеряется размер отверстия во втулке, но

калибр представляет собой цилиндр, который называют пробкой.

Детали, насаживаемые на вал, могут быть с ним соединены различно. Например, коллектор и листы ротора должны сидеть на валу неподвижно, так как при разборке двигателя они не снимаются с вала. Внутреннее кольцо

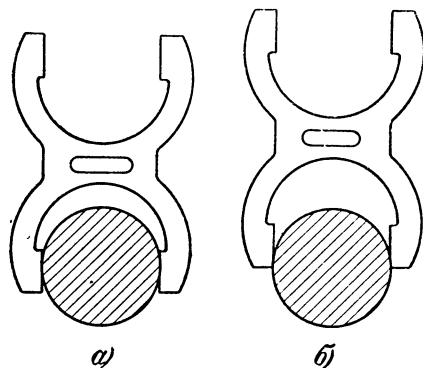


Рис. 6-2. Измерение вала при обработке.

шарикоподшипника должно быть насажено на вал плотно и при работе не проворачиваться относительно вала. Но после износа или при поломке старый шарикоподшипник надо снять, а на его место посадить новый. Таким образом, соединение шарикоподшипника с валом хотя и плотное, но разъемное. Наконец, бронзовая втулка подшипника скольжения должна надеваться на вал совершенно свободно, так как шейка вала вращается в ней при работе двигателя. Как же достигаются разные соединения деталей с валом?

В начале развития производства, когда оно носило единичный характер, пригонка двух соединяемых деталей производилась при совместной обработке их на станках. Сначала рабочий обрабатывал вал, а потом пригонял к нему размеры втулки с требуемой плотностью посадки. При таком способе производства втулка подходила только к одному валу. По мере развития производства такой метод тормозил рост производства. Поэтому выявилась необходимость обрабатывать соединяемые детали независимо друг от друга на разных станках. В современных производствах такие детали изготавливаются в массовых количествах, затем поступают в сборку и подходят одна к другой

без выбора и дополнительной пригонки. Как же обеспечаются различные соединения деталей?

Если требуется неподвижное соединение втулки с валом, то допуски на изготовление подбираются так, чтобы отверстие во втулке при всех отклонениях размеров было меньше диаметра вала, на который при сборке насаживается втулка. Тогда между валом и втулкой будет натяг. Втулка на вал надевается сильным давлением пресса, благодаря чему и осуществляется неразъемное соединение деталей. При плотных, но разборных соединениях допуски на изготовление деталей выбирают с меньшим натягом. Наконец, если требуется свободное вращение вала во втулке, допуски подбирают так, чтобы отверстие во втулке было больше диаметра вала. Образующий между ними зазор обеспечивает легкое вращение вала во втулке.

Взаимозаменяемость деталей имеет очень важное значение при производстве различных изделий. Без нее невозможно было бы не только массовое, но и серийное производство.

Теперь переходим к описанию изготовления различных деталей электродвигателей. Для каждой детали сначала излагается заводский технологический процесс, а затем даются указания, как эту деталь можно более просто изготовить самому.

#### **6-4. Вал**

В двигателях заводского изготовления вал представляет собой ступенчатый цилиндр. Каждая ступень обрабатывается с такими допусками, какие необходимы для посадки различных деталей. Вал обрабатывают сначала на токарном станке, а окончательную доводку размеров производят на шлифовальном станке (рис. 6-1).

При изготовлении самодельного двигателя невозможно выдерживать размеры соединяемых деталей с допусками в тысячные доли миллиметра. Поэтому придется прибегать к методам единичного производства и пригонять размеры деталей друг к другу. В двигателях малой мощности можно скреплять детали и такими способами, как паяние оловом, а то и просто склеивание клеем БФ-2, который продается в магазинах хозяйственных товаров.

Проще всего сделать вал из прутка стали из деталей «конструктора». Если он длинен, можно отрезать кусок ножовкой или обыкновенным лобзиком для выпиливания по дереву.

Лишнюю длину вала лучше отрезать после сборки всего ротора или якоря, так как в процессе напрессовки сердечника концы вала могут получить повреждения.

Диаметр вала должен составлять около 20% диаметра ротора. Таким образом, для двигателя, рассчитанного в § 5-6, с диаметром якоря 26 мм можно для вала взять прутки диаметром 5 мм.

Заготовка для вала должна быть ровной, без изгибов. Это можно проверить, прикладывая к валу линейку. Изогнутую заготовку вала можно выправить, для чего положить ее выпуклостью вверх на ровной доске и легкими ударами деревянного молотка выправить изгиб.

### 6-5. Листы статора и ротора (якоря)

При массовом производстве для ротора и статора требуется очень большое количество тонких листов, исчисляемое десятками и сотнями тысяч в день. Все листы должны быть одинаковых размеров, чтобы после сборки сердечника стенки пазов получались гладкими. Массовое производство деталей из листового материала производится методом холодной штамповки. Принцип холодной штам-

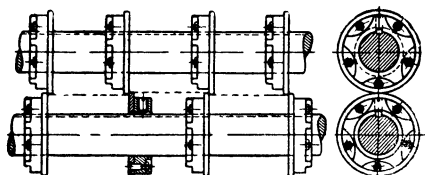


Рис. 6-3. Роликовые ножницы.

повки заключается в следующем. Сначала лист электротехнической стали разрезают на полосы шириной на 2—3 мм больше диаметра статора. Лист разрезают сразу на требуемое число полос на роликовых ножницах, которые состоят из стальных дисков с острыми краями, насаженными на два валика (рис. 6-3). Валики вращаются в противоположные стороны электродвигателем. Если подвести кромку листа стали к роликам, то они при вращении разрежут лист на ровные полосы.

Конец полосы кладут под штамп. Штамп состоит из двух основных частей — пуансона 1 и матрицы 2 (рис. 6-4). Матрица при штамповке остается неподвижной, а пуансон ходит вверх и вниз. Движения пуансону передаются кривошипным механизмом пресса. Пуансон представляет со-

бой стержень, торец которого имеет форму штампуемого изделия.

Матрица представляет собой стальную плиту, в которой выпилено окно. В это окно с очень малым зазором входит пуансон при движении вниз.

Полоса 3 лежит на матрице. Когда пуансон опустится, он вырубит из полосы лист 4 такой формы, которую имеет

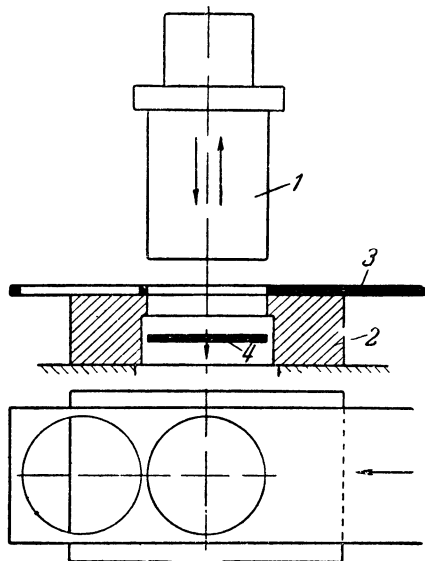


Рис. 6-4. Устройство штампа.

1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — полоса; 4 — лист.

пуансон. Затем полосу продвигают, и штамп вырубает следующий лист.

При массовом производстве применяют сложные штампы, которые одновременно штампуют из полосы листы и ротора и статора. Готовые листы проваливаются сквозь отверстия в матрице и попадают в специальные ящики, откуда они идут на сборку. Последовательность операций штамповки показана на рис. 6-5.

Такой штамп обладает очень большой производительностью. Он может при автоматической подаче длинной полосы, намотанной в виде рулона, наштамповать за одну минуту до 300 листов статора и ротора. Однако из-за высокой стоимости он может применяться только в массовом производстве.

При серийном производстве применяют более простые штампы. Один штамп вырубает из полосы круглую ваготку, другой — рубит пазы статора по одному. После каждого удара штампа лист поворачивают на угол между двумя пазами. Третий штамп рубит по одному пазы ротора, четвертый отделяет лист ротора от листа статора. Таким образом, вместо сложного штампа применяют че-

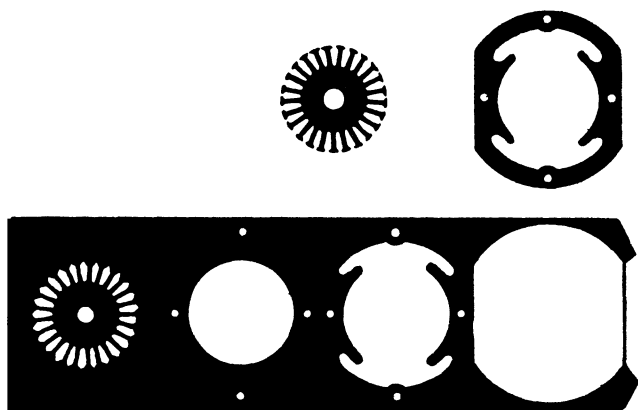


Рис. 6-5. Последовательность операций при штамповке.

тыре, но они очень просты и много дешевле одного сложного.

Мы с вами делаем один двигатель, у нас даже не серийное, а единичное производство. Поэтому надо стремиться сделать листы ротора и статора минимальным числом простых штампов. Для самодельных двигателей вместо электротехнической стали можно применять любую тонкую жель, используя, например, консервные банки. Наружный контур листа статора лучше сделать прямоугольным (см. рис. 4-2 и 5-11), так как прямые линии контура легко можно вырезать ножницами и потом в собранном сердечнике опилить напильником, сделав их гладкими. Пазы уже при расчете выбраны круглыми и их можно просверлить дрелью в собранных сердечниках статора и ротора. То же можно сделать и с отверстием для вала.

Таким образом, остается только один действительно необходимый штамп для вырубки внутреннего отверстия в листе статора. Вырубленный кружок пойдет на изготовление листов ротора. При единичном производстве мел-



ких деталей можно обойтись без прессы, заменив его обыкновенными слесарными тисками.

Штамп делается следующим образом. Железную полосу 1 толщиной 2—3 мм сгибают в скобу (рис. 6-6) и про- сверливают в ней отверстие, равное отверстию в листе статора. Затем вытачивают на токарном станке стержень 2

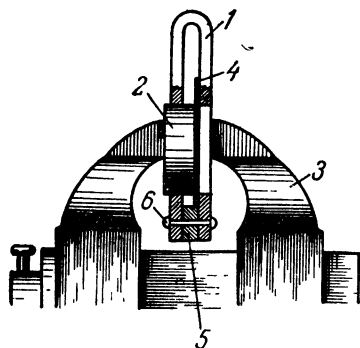


Рис. 6-6. Простой штамп для са- модельного двигателя.

1 — скоба; 2 — стержень; 3 — тиски; 4 — заготовка листа статора; 5 — про- кладка; 6 — заклепка.

внутренние контуры можно вырубить в листах статора зубилом, а после сборки сердечника опилить поверхности напильником. Заготовку надо взять с таким расчетом, чтобы при штамповке получился круглый лист ротора без срезанной горбушки (рис. 6-21).

Если вы делаете несколько двигателей и штамп затупился, то достаточно торец стержня спилить напильником и штамп опять сделается острым.

При штамповке края листов могут загигаться в сторону пуансона; эти загиги, называемые заусенцами, особенно заметны при большом зазоре между пуансоном и матрицей. Их надо спилить острым напильником, так как иначе, несмотря на слой изоляции, листы будут замыкаться друг с другом, и в сердечниках статора возникнут большие потери от вихревых токов.

### 6-6. Сердечник ротора (якоря)

Для изготовления сердечника ротора надо взять две стальные планки 1 толщиной 5—8 мм и стороной квадрата на 10 мм больше диаметра кружка 5. В углах пла-

нок просверлить четыре отверстия диаметром 8,5 мм, чтобы через них могли свободно пройти стягивающие шпильки диаметром 8 мм (рис. 6-7). В одной из планок разметить закаленной стальной иглой отверстие 3 для вала в центре, вокруг него отверстие 4 для пазов ротора и два отверстия 6. Размеры этих отверстий взять из расчета двигателя.

В центре каждого отверстия надо острым керном (заостренным стальным стержнем) выбить углубления, и циркулем с иглой провести окружности из этих центров. Диаметры окружностей должны быть на 0,5 мм больше диаметра отверстия, чтобы при сверлении было видно, не ушло ли сверло в сторону. Затем надо просверлить в планках два отверстия 6 для штифтов, по которым будет центрироваться сердечник ротора.

Кружки, вырезанные штампом, надо смазать с обеих сторон при помощи кисти тонким слоем клея БФ-2, который продается в тубиках в магазинах хозяйственных товаров.

Слой клея не только скрепляют кружки, но и изолируют их друг от друга. Затем кружки разложить на доске над батареей центрального отопления или на солнышке, подложив под них спички, чтобы они не прилипали к доске. Сушку продолжать до тех пор, пока на кружках не образуется упругая липкая пленка. Высушенные кружки надо уложить в стопку так, чтобы их наружные контуры точно совпадали. Сверху и снизу на стопку кладут по листу бумаги, чтобы крайние листы не прилипали к планкам. На якорь коллекторного двигателя вместо бумаги

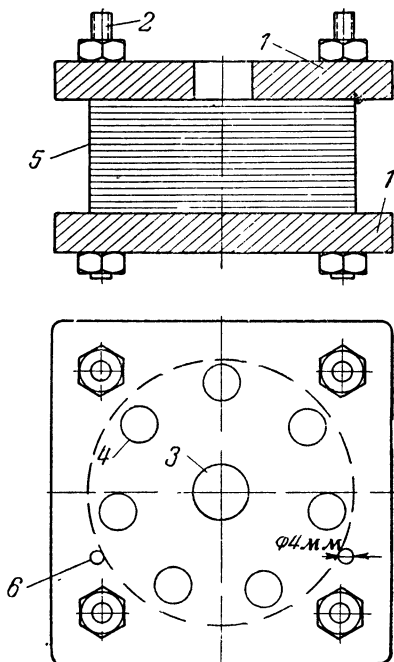


Рис. 6-7. Приспособление для прессовки ротора.

1—планка; 2—шпилька; 3—отверстие для вала; 4—пазы; 5—кружки; 6—отверстие для штифта.

надо положить кружки, вырезанные из картона толщиной около 1 мм. Они будут защищать от повреждений изоляцию проводников при обмотке якоря. Если якорь будет подвергаться запечке, то картонные кружки с пазами приклеиваются к торцам якоря после запечки.

Стопку кружков между планками устанавливают так, чтобы она касалась штифтов в отверстиях б. В четыре отверстия вставляют шпильки и, затягивая поочередно гайки ключом, туго сжимают стопку. Расстояние между планками должно быть равно длине ротора  $l$  плюс толщина картонных кружков, если они в этом роторе имеются.

Спрессованный таким образом сердечник ротора вместе с планками надо положить в печь или духовку с температурой, при которой кусочки бумаги обугливаются, но не загораются. Вынуть сердечник из печи можно после ее остывания. Эта операция называется запечкой сердечника. При запечке кружки склеиваются настолько прочно, что сердечник будет представлять собой как бы сплошной кусок металла, в котором можно сверлить отверстия для вала и пазов, пользуясь разметкой на верхней планке. Для того чтобы сверло не уходило в сторону, рекомендуется сначала просверлить отверстия сверлом меньшего диаметра.

Для изготовления вала нужно взять приготовленный прутки стали. Конец прутка, который после будет отрезан, надо запилить на конус. Края отверстия для вала смазать клеем БФ-2, дав ему подсохнуть, после чего забить вал в центральное отверстие. Если выступающий конец вала не будет мешать сверлению пазов, то забить вал можно и перед запечкой сердечника. После засыхания клея сердечник будет прочно держаться на валу. Отвернув гайки, надо снять с сердечника планки — и сердечник готов.

Готовый ротор надо поставить на токарный станок, сточить слой металла, равный воздушному зазору между статором и ротором, и ножовкой прорезать щели для укладки проводников в пазы.

### **6-7. Обмотка якоря коллекторного двигателя**

Обмотки якоря машин средней и большой мощности выполняются из намотанных на специальных шаблонах секций, которые затем вкладывают в пазы якоря. У двигателей малой мощности удобнее выполнять обмотку, наматывая провод непосредственно в пазы якоря. При мас-

совом производстве эта операция выполняется на сложных обмоточных станках. При серийном и единичном производстве намотку провода в пазы якоря производят вручную.

До начала обмотки пазы якоря надо изолировать. Для напряжения 12 в в качестве изоляции паза можно применить пропитанную парафином плогную бумагу толщиной 0,1 мм в один слой. Пропитка делается для того, чтобы бумажная прокладка не отсыревала при хранении двигателя в холодном помещении. Изолировать удобнее длинной полосой бумаги, которой должно хватить на обертывание всей длины окружности якоря вместе с пазами. Ширина полосы должна быть на 2 мм больше длины якоря, включая и картонные кружки на торцах. Конец полосы 3 сгибают трубочкой, вдвигают в первый паз и зажимают в нем деревянной палочкой 4 (рис. 6-8). Затем через зубец 2 переводят полосу во второй паз и вставляют вторую палочку. Вставляя изоляцию в третий паз, можно вынуть палочку из первого паза. Обойдя весь якорь, надо склеить начало и конец бумажной полосы. Выступающие из пазов концы бумажных трубочек надо примять пальцами к торцу якоря. На вал с обеих сторон необходимо надеть изоляционные трубочки из любого материала длиной, равной 0,4 диаметра якоря. Чтобы трубочки не сдвигались вдоль вала, их надо подклеить клеем и дать подсохнуть. Теперь проводники обмотки будут изолированы и от торцов якоря и от вала.

Здесь будет объяснен процесс обмотки якоря для двигателя, рассчитанного в § 5-7. Обмотку можно производить двумя способами.

**Первый способ.** Посмотрим обмоточные данные якоря. Он имеет семь пазов и семь пластин коллектора. В каждом пазу должно быть по 88 проводников. Для обматывания берут якорь в левую руку, а правой обводят провод вокруг якоря. Якорь держат к себе той стороной, с ко-

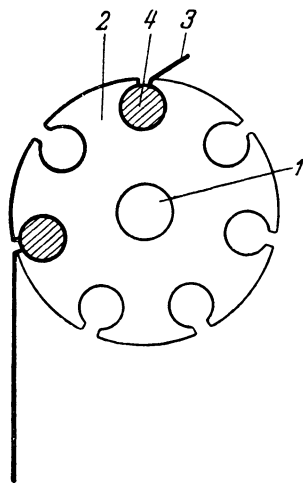


Рис. 6-8. Изолировка пазов.  
1 — вал; 2 — лист ротора;  
3 — полоса изоляции; 4 — палочка.

торой будет насажен коллектор. Обмотка производится без коллектора, так как он будет мешать.

Выпустите из первого паза конец провода длиной около 30 мм и прижмите его пальцем к торцу якоря. Намотайте 44 витка из паза 1 в паз 4 (рис. 6-9). Сделайте переход из паза 1 в паз 2 в виде петли длиной 30 мм. Намотайте из паза 2 в паз 5 также 44 витка в том же направлении намотки. Сделайте переход из паза 2 в паз 3 такой же петлей. Продолжайте намотку якоря из паза 3 в паз 6

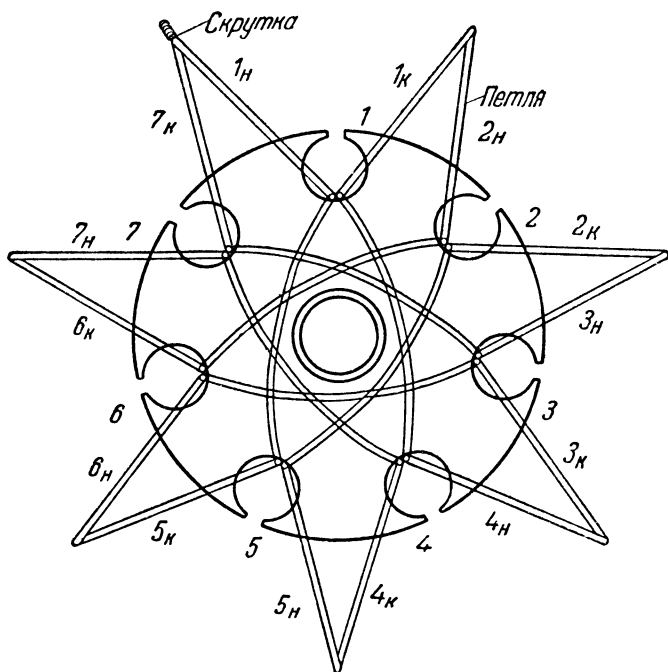


Рис. 6-9. Схема обмотки якоря.

тоже 44 витка. Затем намотка пойдет из паза 4 в паз 7. После намотки 44 витков паз 4 будет заполнен всеми 88 проводниками, которые в нем должны лежать согласно расчетным данным. После этого намотка переходит из паза 5 в паз 1, причем будут заполнены пазы 5 и 1. Не забывайте при каждом переходе оставлять петлю для соединения обмотки с коллекторными пластинами. Последние 44 витка будут уложены в пазы 7 и 3, после чего конец обмотки из паза 7 надо скрутить с началом из паза 1,

зачистив на них изоляцию. На этом обмотку якоря заканчивают.

На схеме выводы обмотки имеют обозначения. Цифры означают номера катушек, буква *н* — начало катушки, а буква *к* — конец катушки. Петли с зачищенной изоляцией припаивают к пластинам коллектора. Пластина *1* расположена против первого паза. К ней припаивают петлю *1к* и *2н*.

**Второй способ.** Намотка по первому способу хотя и проста, но имеет следующий недостаток. Первые витки плотно прижимаются к торцу якоря, а последние пересекаются с ними и получаются более длинными. Поэтому если посмотреть на торец якоря, то обмотка выглядит однобокой. Намотка по второму способу несколько слож-

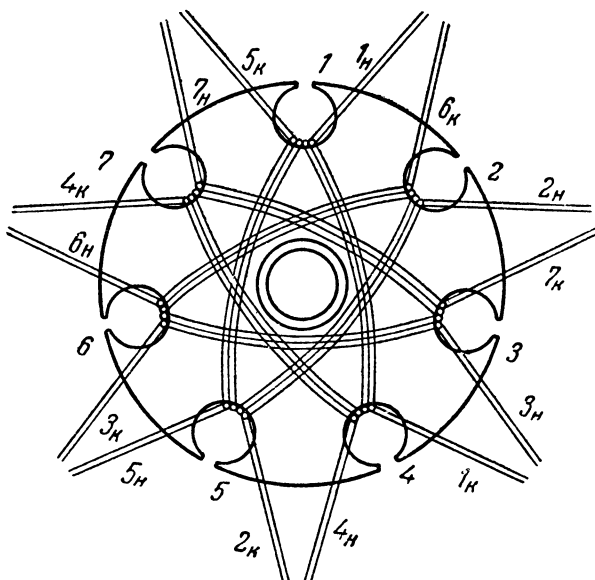


Рис. 6-10. Схема обмотки якоря «в елочку».

нее, но зато получается более симметричной. Этот способ называется намоткой «в елочку».

Выпустите из паза *1* конец провода *1н* длиной 30 мм и прижмите его пальцами к торцу якоря. Наматывайте из паза *1* в паз *4* 44 витка. Теперь уже нельзя делать соединения между пазами в виде петель, так как катушки наматываются не подряд. Поэтому надо отрезать конец ка-

тушки *1к* от бухты с проволокой и выпустить его из паза *4*. Вторая катушка из 44 витков будет наматываться из паза *5* в паз *1*, и выводы ее обозначены *5н* и *5к*. Чтобы при соединении катушек не спутать выводные концы, надо укрепить на них картонные квадратики с обозначениями согласно схеме. После намотки двух катушек паз *1* будет заполнен полностью, а пазы *4* и *5* наполовину. Следующая катушка с выводами *2н* и *2к* наматывается из паза *2* в паз *5*, а затем из паза *6* в паз *2* по 44 витка. После этого переходим к намотке катушек из паза *3* в паз *6* и из паза *7* в паз *3*. Последней наматывается катушка из паза *4* в паз *7*.

На этом намотка заканчивается. Из пазов выходят 14 выводов катушек. Соединить их между собой и с коллектором надо в таком же порядке, как на схеме рис. 6-9.

Вывод <i>1к</i>	соединяется с <i>2н</i>	и припаивается к коллекторной пластине <i>1</i>
" <i>2к</i>	" " <i>3н</i>	" " " " <i>2</i>
" <i>3к</i>	" " <i>4н</i>	" " " " <i>3</i>
" <i>4к</i>	" " <i>5н</i>	" " " " <i>4</i>
" <i>5к</i>	" " <i>6н</i>	" " " " <i>5</i>
" <i>6к</i>	" " <i>7н</i>	" " " " <i>6</i>
" <i>7к</i>	" " <i>1н</i>	" " " " <i>7</i>

По окончании намотки острым лезвием от безопасной бритвы сделайте над каждым зубцом якоря два прореза, чтобы отделились полоски бумаги, которой изолированы зубцы. Можно сделать и так: провести бритвой по середине зубца, а отогнувшиеся края пазовых трубочек срезать ровень с окружностью якоря.

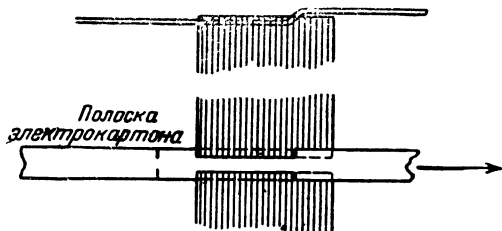


Рис. 6-11. Заклинивание пазов якоря.

Теперь тупым ножом загните края бумажных полосок внутрь паза (см. рис. 5-7). При этом надо соблюдать осторожность, чтобы не повредить изоляцию проводников. Чтобы проводники обмотки при вращении якоря не выступали из пазов, надо их запереть в пазу полосками плотного картона толщиной около 0,3 мм. Ширина полос-

ки для данного паза должна быть 4 мм. Но как такую тонкую полоску вдвинуть в паз? Ведь она согнется. Для этого применяют способ запираания пазов «впродержку».

Способ заключается в следующем. Сделайте на расстоянии 26 мм, равном длине якоря, два надреза ножницами на глубину по 1 мм с каждой стороны, как показано на рис. 6-11. Согните полоску дугой так, чтобы края ее зашли в паз, и тащите полоску вдоль якоря, тогда края ее зайдут в паз по всей его длине. Теперь можно отрезать выступающую из паза полоску, снова сделать два надреза ножницами и вдвигать полоску во второй паз. Через несколько минут все пазы якоря будут заперты такими полосками.

### 6-8. Коллектор

Для коллекторных двигателей постоянного и переменного тока нужен коллектор. Он является одной из самых сложных частей двигателя. Сначала покажем, как выполняются коллекторы двигателей заводского изготовления.

Коллекторные пластины изготавливаются из медных полос 1, имеющих трапецевидальное сечение (рис. 6-12). Из полос нарезают кусочки длиной, на 2—3 мм большей дли-

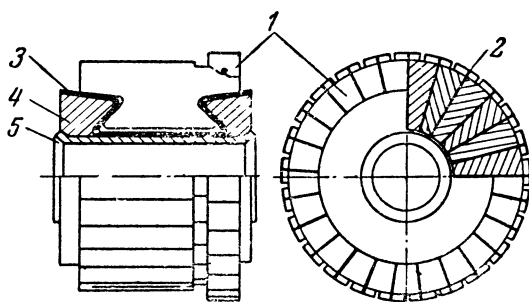


Рис. 6-12. Коллектор.

1 — пластина; 2 — миканитовая прокладка; 3 — миканитовое кольцо; 4 — стальное кольцо; 5 — трубка.

ны коллектора. По концам кусочков вырубают штампом углубления треугольной формы. Затем коллекторные пластины собирают в круг с прокладками 2 из миканита. Миканит представляет собой чешуйки слюды, склеенные лаком. Для коллекторов применяется специальный миканит, у которого количество лака не превышает 7% общего веса миканита, чтобы при прессовке коллектора миканит



не распалзлся на отдельные чешуйки. Благодаря трапецидальной форме сечения все пластины плотно прилегают к миканитовым прокладкам и сжимают их. На собранные в круг пластины напрессовывают стальное кольцо, которое прочно сжимает пластины между собой. Затем в треугольные углубления пластин вкладывают сделанные также из миканита кольца 3, имеющие такое же сечение, как углубления в пластинах. После этого в миканитовые кольца кладут стальные кольца 4, выточенные или согнутые из листовой стали. Внутрь коллектора вставляют трубку 5, согнутую из листовой стали. Концы трубки

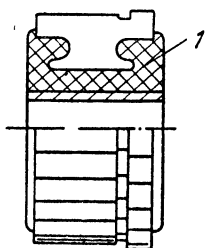


Рис. 6-13. Коллектор на пластмассе.  
1 — пластмасса.

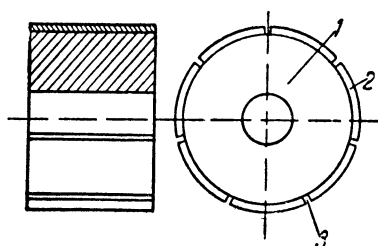


Рис. 6-14. Цилиндрический коллектор самодельного двигателя.  
1 — втулка; 2 — пластинка; 3 — промежутки между пластинами.

с обеих сторон разгибают по всей окружности при помощи конических стержней, сдавливаемых усилием пресса. Теперь можно снять прессующее кольцо, так как пластины будут удерживаться стальными кольцами в углублениях коллекторных пластин. Окончательную обработку поверхности коллектора производят после насадки его на вал.

При массовом производстве коллекторов малых машин вместо нажимных стальных колец и миканитовых колец применяют пластмассу 1 (рис. 6-13). Она в виде порошка насыпается внутрь коллектора и под большим давлением с одновременным нагревом превращается в сплошную прочную массу. Этот процесс производится в специальных пресс-формах.

Такие коллекторы нельзя изготовить без специального оборудования и материалов, но можно придумать более простые конструкции для самодельных двигателей (рис. 6-14). Коллектор состоит из изоляционной втулки 1, которая может быть выточена из гетинакса. Затем надо подготовить полоски 2 из листовой меди толщиной

около 0,5 мм. Диаметр втулочки и ширина пластин должны быть рассчитаны так, чтобы при укладывании полосок по окружности втулки между ними оставались промежутки 3 около 1 мм. Втулочку надо смазать клеем БФ-2, дав ему подсохнуть несколько часов. Выгнутые по окружности втулочки полоски надо равномерно расположить, обмотать мягкой проволокой и положить в печь на просушку. Температура должна быть невысокой, так как иначе втулочка сгорит. После просушки проволоку можно снять, насадить коллектор на вал и, вращая якорь, снять стеклянной бумагой все выступы и неровности на его поверх-

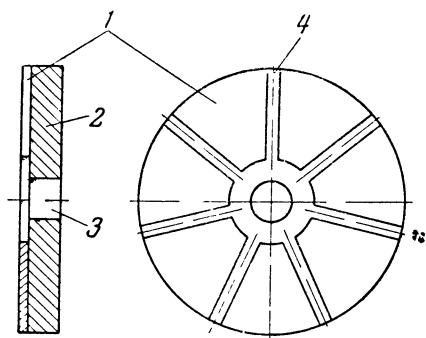


Рис. 6-15. Торцовый коллектор самодельного двигателя.

1 — пластина; 2 — кружок; 3 — отверстие для вала; 4 — промежуток между пластинами.

ности. Если не удастся достаточно прочно приклеить полоски к втулочке, то на концы полосок можно намотать пояски из суровой нитки, промазав их клеем и просушив. При этом длину коллектора надо взять с запасом, чтобы щетки уместились между поясками.

Еще лучше сделать не цилиндрический, а торцовый коллектор (рис. 6-15), в котором щетки будут прилегать к плоской поверхности, и контакт между ними и пластинами коллектора 1 будет надежнее. Кроме того, такой коллектор имеет меньшую длину вдоль вала, а потому и двигатель получится меньших размеров. Диаметр торцового коллектора в маленьких двигателях берут равным диаметру якоря, так как при малом коллекторе трудно расположить подшипник между щетками. Для изготовления коллектора надо иметь кружок 2 из гетинакса, текстолита или из фибры толщиной 2—3 мм и кольцо из

листовой меди толщиной 1—1,5 мм. Отверстие 3 в кружке должно быть равно диаметру вала, а в медном кольце несколько больше. Кольцо с кружкой склеивают клеем БФ-2 и сушат в печи в течение 12 ч. Затем кольцо размечают радиальными линиями 4 по количеству пластин в соответствии с расчетом двигателя. Концом ножовочного полотна медное кольцо разрезают на части по всем радиальным линиям разметки. Это и будут пластины коллектора. При нечетном числе коллекторных пластин разрезку кольца на пластины удобнее производить до приклеивания их к кружке. Если пластины не держатся клеем, можно их приклепать медными заклепками, но головки заклепок должны быть утоплены в конических углублениях в медных пластинах. При насадке на вал надо проверить угольником перпендикулярность плоскости медных пластин по отношению к валу.

Коллекторы не должны качаться на валу. Для устранения этого можно посадить их на вал на клею или даже обернуть вал слоем бумаги с проклейкой. Петли обмотки надо припаять к коллекторным пластинам оловянным припоем при помощи паяльника. Изоляция на проводниках должна быть тщательно зачищена. При пайке нельзя пользоваться соляной кислотой, так как она разъедает изоляцию. Вместо кислоты надо применять канифоль.

## 6-9. Щетки и щеткодержатели

Щетки служат для передачи тока от вращающегося коллектора к неподвижным частям двигателя и обратно. Как уже говорилось в § 2-3, надежно работают только прессованные щетки из графитовых и угольных порошков. Щетки в виде медных пластинок, прилегающих к пластинам коллектора, быстро перегорают сами и сильно изнашивают пластины коллектора.

Щетки бывают круглого и прямоугольного сечений. Щетку требуемых размеров можно выпилить лобзиком или выточить из сработанных щеток более крупных машин, которые можно достать в ремонтных мастерских, где щетки после износа приходится выбрасывать. Для некоторых двигателей и генераторов, например для автотракторного оборудования, запасные щетки продаются в магазинах. Однако если вам не удалось достать старой щетки от большой машины, на помощь может прийти обычный мягкий карандаш. Из исписанных карандашей

выньте кусочки графита. Одного графита мало, через него можно пропустить ток только около  $0,2 \text{ а}$ , а в двигателе, рассчитанном в § 5-7, ток равен  $1,4 \text{ а}$ . Из отдельных кусочков графита можно склеить и большую щетку. На рис. 6-16,а показана квадратная щетка, склеенная из четырех графитиков, а рядом круглая (рис. 6-16,б), склеенная из семи графитов. Клеить можно любым клеем, даже конторским. Можно также использовать угольные стерженьки из батарейки. Для торцового коллектора рабочую поверхность щетки, прилегающую к коллектору, надо опилить тонким напильником с мелкой насечкой, а затем шкуркой, чтобы все графитики касались пластин коллектора. Сложнее обстоит дело при цилиндрическом коллекторе. У него рабочая поверхность щетки должна быть вогнутой.

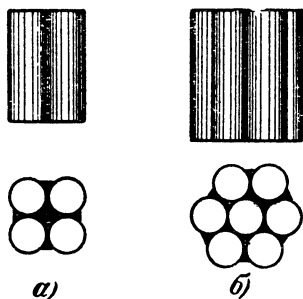


Рис. 6-16. Щетка из карандашных графитиков.

а — квадратная; б — круглая.

Этого можно добиться, если приставить ее к вращающемуся цилиндру, диаметр которого равен диаметру коллектора. Прирабатывать щетку придется довольно долго и лучше это делать не в комнате, так как графитовая пыль очень мелкая и далеко разлетается, пачкая окружающие предметы.

Щетки должны прижиматься к поверхности коллектора. Для этого служат щеткодержатели. Щеткодержатель двигателя заводского изготовления (рис. 6-17, слева) состоит из латунной втулки 1 с квадратным отверстием, в которое вставлена щетка 2. Латунная втулка опрессована пластмассой 3, которая изолирует ее от корпуса двигателя 4. Над щеткой помещается спиральная пружинка 5 из тонкой проволоки. Сверху на трубку навинчен колпачок 6, который удерживает щетку и пружинку от выпадения из трубки. Подвинчивая колпачок, можно регулировать давление пружинки. Щеткодержатель запрессовывается в стенку корпуса двигателя. В двухполюсном двигателе должны быть два щеткодержателя со щетками. Они должны быть установлены так, чтобы щетки стояли между полюсами магнитной системы двигателя. Щеткодержатели должны быть изолированы друг от друга и от корпуса

двигателя. Для отвода тока к щеткодержателю должен быть привинчен или припаян изолированный проводник.

Щеткодержатели такого типа особенно удобны для двигателей с торцовым коллектором, так как они распо-

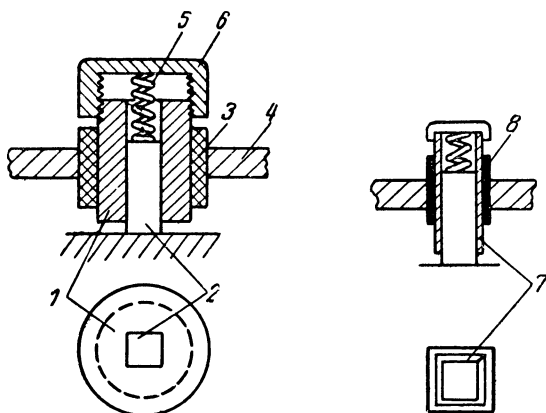


Рис. 6-17. Щеткодержатель.

1 — втулка; 2 — щетка; 3 — пластмасса; 4 — корпус двигателя; 5 — пружинка; 6 — колпачок; 7 — листовая латунь; 8 — изоляция из бумаги

лагаются в крышке двигателя и занимают мало места по длине. Ввиду трудностей изготовления втулки из массивного куска металла ее можно согнуть из листовой меди 7

или латуни. Внутреннее отверстие втулки должно иметь такие размеры, чтобы щетка легко перемещалась вдоль втулки, но не застревала в ней. Изоляцию втулки 8 можно выполнить, обернув ее несколькими слоями бумаги. В зависимости от формы сечения щетки втулка может быть как круглой, так и квадратной. Для снижения перекоса щетки при изменении направления вращения двигателя втулка должна отстоять от поверхности коллектора не более чем на 2 мм.

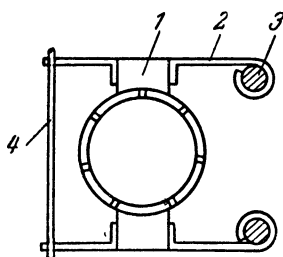


Рис. 6-18. Щеткодержатель самодельного двигателя.

1 — щетка; 2 — пружинная пластинка; 3 — ось; 4 — резиновая нить.

Для цилиндрического коллектора можно применить другую конструкцию щеткодержателя (рис. 6-18). Здесь щетка 1 наглухо зажата в отверстии пружинной пластинки 2, вращающейся вокруг неподвижной оси 3, заделанной

в крышке двигателя. Прижим щетки к поверхности коллектора производится при помощи тонкой резиновой нити 4, связывающей щеткодержатели. Конечно, оба щеткодержателя должны быть изолированы друг от друга и от других металлических частей двигателя. Отвод тока от щеток производится через изолированные проводники, припаянные к щеткодержателям. Простота изготовления такого щеткодержателя определяется тем, что не надо с большой точностью пригонять внутренний размер втулки к щетке.

### 6-10. Ротор асинхронного двигателя

Изготовление ротора асинхронного двигателя гораздо проще, чем якоря двигателя постоянного тока. Здесь нет коллектора и сложной обмотки из большого количества изолированных проводников.

Сборка выштампованных кружков в стопку и сверление отверстий для вала и для пазов производится совершенно так же, как для якоря постоянного тока, описанного в § 6-6. После сборки ротор обтачивают, чтобы образовался зазор между статором и ротором. В асинхронных двигателях зазор между ротором и статором меньше, чем в двигателях постоянного тока, поэтому на поверхности ротора не должно оставаться никаких выступов и неров-

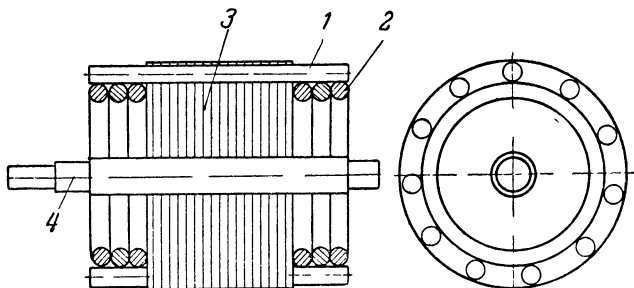


Рис. 6-19. Замыкающие кольца короткозамкнутого ротора из проволоки.

1 — стержень; 2 — замыкающее кольцо; 3 — лист ротора; 4 — вал.

ностей, которые при вращении могут задевать за статор.

В пазы вставляются заранее нарезанные медные стержни, концы стержней выступают из пазов и замыкаются медными кольцами, в которых просверлены отверстия. После вкладывания медных стержней ротор надо скрутить так,

чтобы скос паза был равен пазовому делению статора. Концы стержней расклепывают и пропаивают с кольцами.

Замыкающие кольца можно сделать и проще. На рис. 6-19 показано устройство замыкающих колец 2 из той же проволоки, из которой нарезаны стержни 1. Проволока сгибается в кольца, которые припаяны ко всем стержням. Стыки колец также следует пропаять.

### 6-11. Балансировка якорей и роторов

При вращении камня, привязанного к концу веревки, вы чувствуете центробежную силу, которая натягивает веревку. Эта сила быстро нарастает с увеличением скорости вращения.

Те же силы действуют и на части вращающегося ротора. Поэтому проводники обмотки в пазах запирают клиньями или полосками картона. Если эти силы равномерно распределены по окружности, то они взаимно уравновешиваются и не передаются на подшипники двигателя. Но при изготовлении якоря или ротора может получиться, что одна половина его тяжелее, чем другая. В якорях коллекторных двигателей это может происходить от неравномерного распределения проводников обмотки на торцах якоря, о чем было сказано в § 6-7. Но неравномерное распределение веса может произойти и от того, что листы ротора имеют неодинаковую толщину в разных точках.

Во всех этих случаях центр тяжести ротора не будет совпадать с осью вращения. Если, например, центр тяжести смещен от оси вращения на 2 мм, то центробежная сила создастся весом ротора, который вращается по окружности радиусом 2 мм. Правда, окружность эта очень мала, но ротор обладает довольно большим весом и вращается со скоростью в несколько тысяч оборотов в минуту. Поэтому центробежные силы могут в несколько раз превышать вес ротора. Эти силы будут при вращении толкать ротор в разные стороны и создавать большие нагрузки на подшипники двигателя.

Центробежные силы вызывают дрожание всего двигателя при работе. Это дрожание называется вибрацией. Вибрации передаются и на тот механизм, который двигатель приводит во вращение.

Как же устранить эти вибрации? Так как причиной вибраций является смещение центра тяжести ротора, то

надо устранить смещение. Этот процесс называется балансировкой ротора. На заводах балансировка выполняется на точных балансировочных станках. Однако можно выполнить балансировку и на простом приспособлении. Установите строго горизонтально две линейки. Горизонтальность можно проверить, положив на линейки ровное стекло, на котором находится стальной шарик. Надо выверять положение линеек, прокладывая под ними слои бумаги.

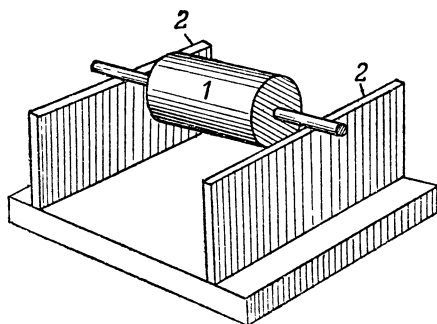


Рис. 6-20. Балансировка ротора.  
1 — ротор; 2 — линейки

Если шарик в любом положении будет стоять спокойно и не начнет катиться, значит плоскость стекла горизонтальна. Еще точнее можно выверить положение плоскости уровнем или ватерпасом, в котором воздушный пузырек перемещается в трубке с водой.

Положите ротор 1 шейками вала на линейки 2 и, перекачивая его рукой, останавливайте в разных положениях (рис. 6-20). Если у ротора нет большого смещения центра тяжести, то он будет сохранять неподвижное состояние в любом положении. Но обычно ротор начинает перекачиваться по линейкам. Он остановится тогда, когда центр его тяжести окажется в самой нижней точке. Попробуйте вывести его из этого положения и он снова в него вернется; теперь определено, в какую сторону сместился центр тяжести. Как же совместить его с центром вращения? Возьмите кусочек металлической полоски и забейте ее в верхний паз якоря. Путем нескольких проб можно подобрать вес кусочка так, что якорь перестанет перекачиваться на линейках. К ротору асинхронного двигателя можно припаивать кусочки олова на замыкающие кольца.



Смысл балансировки заключается в том, чтобы дополнительный груз уравновесил смещенный центр тяжести ротора. Но как маленький грузик мог уравновесить тяжелый ротор? Это объясняется тем, что центр тяжести ротора смещен от центра вращения на небольшое расстояние, которое иногда выражается в долях миллиметра. А грузик расположен на наружной окружности ротора и удален от центра вращения на десятки миллиметров. Таким образом, момент маленького грузика оказывается равным моменту ротора относительно оси вращения.

## 6-12. Статор коллекторного двигателя

После вырубки кружка якоря осталась заготовка для листа статора. Штамп для вырубки умышленно был сделан по внутреннему диаметру статора, а не по наружному диаметру якоря. Зазор между статором и ротором получился за счет обточки якоря. Следовательно, внутреннюю поверхность статора можно теперь не обрабатывать. Это большое преимущество, так как обработка внутренних отверстий сложнее, чем обработка наружной поверхности цилиндра.

Внутреннюю окружность статора надо сделать ровной, не обрабатывая ее, а только уложив при сборке все листы без сдвигов друг относительно друга. Это можно показать на таком примере. Будем складывать стопку листов бумаги. Края ее будут неровными: одни листы сдвинуты в одну сторону, другие в противоположную. Поднимем стопку и постучим ребром по столу, все листы выравняются с одной стороны и торец стопки с этой стороны будет совершенно ровный. Другие же стороны стопки останутся неровными из-за неодинаковых размеров листов. Но листы статора надо собрать ровно не по прямой линии, а по внутренней окружности. Следовательно, при сборке надо их надевать на направляющий цилиндр, который в производстве называют оправкой.

Наружные стороны статора при сборке могут получиться неровными, их после сборки можно опилить напильником.

Но пока рано говорить о сборке листов, они еще не имеют окончательной формы. После вырубки штампом кружков получилась заготовка в форме, показанной на рис. 6-21. Надо вырубить перемычку *a*, которая получи-

лась за счет увеличения длины заготовки, чтобы получить полный кружок для якоря. Ее можно вырубить зубилом на металлической плите, а у листа из тонкой жести вырезать ножницами. Чтобы образовать место для намотки катушки, надо вырезать часть заготовки *б* зубилом, ножницами или лобзиком. Выберите наиболее удобный способ. Начертите острой стальной иглой форму выреза на

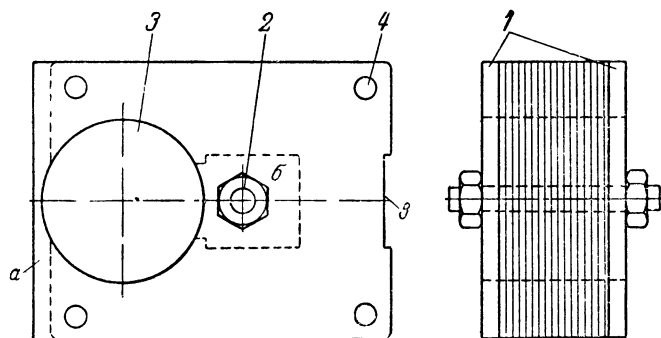


Рис. 6-21. Приспособление для прессовки статора.  
 1 — пластины; 2 — стяжная шпилька; 3 — оправка; 4 — отверстие в листе статора.

одном из листов и точно вырубите по начерченному контуру.

При выпиливании или вырубке остальных листов этот лист будет служить шаблоном. Его надо прикладывать к каждой заготовке листа статора. Углубление в середине сердечника под катушку можно выпилить напильником после сборки сердечника статора.

Для снижения потерь от вихревых токов листы надо покрыть лаком. Для этого лучше воспользоваться клеем БФ-2, который не только будет создавать изоляционную пленку между листами, но и склеит их. Благодаря этому отпадает необходимость в скреплении листов заклепками или винтами и конструкция двигателя упростится. Процесс склеивания был описан в § 6-6. Сжимать листы в процессе склеивания и выпечки можно двумя железными пластинами *1* толщиной 8 мм, стянутыми одним центральным болтом или шпилькой *2* (рис. 6-21). Эти пластины не должны упираться в оправку *3*, поэтому в них надо просверлить отверстия или выпилить вырез *б* соответствующей формы.

После запечки надо очистить пакет статора наждачной бумагой от наплывов клея, а наружные стороны опилить в тисках напильником.

В сердечнике статора надо просверлить четыре отверстия 4 (рис. 6-21) для крепления статора к основанию, а также для крепления подшипников и щеткодержателей. Эти отверстия должны иметь диаметр, необходимый для прохода шпилек от «механического конструктора» диаметром 3 или 4 мм. Отверстия следует просверлить, не вынимая статора из прессующих планок.

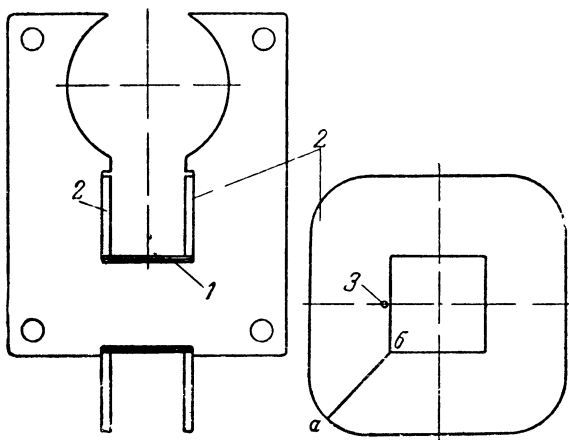


Рис. 6-22. Изолировка статора.

1 — слой бумаги; 2 — фланец; 3 — отверстие для вывода от начала катушки.

После этого можно приступать к намотке катушки возбуждения. Для этого среднюю часть статора надо обернуть несколькими слоями пропарафиненной бумаги 1 так, чтобы общая толщина изоляции была не меньше 1 мм (рис. 6-22). Затем из плотного картона надо вырезать фланцы 2, внутреннее отверстие которых должно иметь размеры сторон на 2 мм больше сторон изолированной части сердечника. С одной стороны фланцы имеют сквозной прорез аб, чтобы их можно было надеть на сердечник статора (рис. 6-22). В одном из фланцев шилом надо проколоть отверстие 3 для вывода проводника от начала катушки. Намотку катушки следует производить правильными рядами виток к витку, передвигаясь от одного фланца к другому и обратно. По окончании намотки конец катушки надо вывести через отверстие в другом

фланце. Для напряжения 12 в, на которое изготавливаются коллекторные двигатели, катушка имеет небольшое число витков, и намотка ее вручную не представляет трудностей.

### **6-13. Статор асинхронного двигателя с короткозамкнутым витком на полюсе**

Этот статор изготавливается так же, как и статор коллекторного двигателя, но имеет добавления в виде короткозамкнутых витков. Отверстия для короткозамкнутых витков просверливают дрелью, а вырезы для второй стороны витка делают круглым напильником. Короткозамкнутый виток сначала изгибается в виде скобы в тисках. После забивания в отверстия в статоре концы витков загибают и пропаивают. Особенностью асинхронных двигателей является малый зазор между статором и ротором. Поэтому поверхность полюсов, обращенная к ротору, должна быть тщательно очищена от всяких шероховатостей во избежание задевания ротора за статор.

У асинхронных электродвигателей, обычно применяемых для настольных вентиляторов, катушка статора рассчитывается на питание непосредственно от осветительной сети. Она должна состоять из большого числа витков, особенно при напряжении осветительной сети 220 в. Намотку катушки тонким проводом невозможно выполнить ровно, обводя рукой с проводом вокруг статора, ее надо делать на простом приспособлении, которое легко изготовить самим (рис. 6-23). Оно состоит из двух стоек 1, между которыми может вращаться статор двигателя. Осью вращения служат штифты 5, для которых в сердечнике статора надо засверлить отверстие глубиной 3—5 мм. Для удобства вращения статора рукой к нему прикреплен диск 3, выпиленный из фанеры. Высота стоек должна быть такой, чтобы самая удаленная от оси вращения точка статора не задевала за основание приспособления 4.

Для повышения надежности выводов катушки сначала надо провод сложить в виде петли в четыре проволоки, в месте ответвления петли зачистить изоляцию провода и все четыре проволоки туго скрутить. Тогда при обрыве одной из проволок другие будут служить проводниками. Надо обогнуть петлей вокруг статора 1—2 раза и затем уже намотать обмотку в одну проволоку. Вывод от начала катушки пропускается через отверстие во фланце и изолируется при помощи чулочка из лакированной ткани или

хлорвинила. При намотке катушки через каждые три-четыре ряда надо прокладывать полоски из папиросной бумаги для повышения надежности изоляции. После намотки каждой сотни витков полезно обогнуть провод бу-

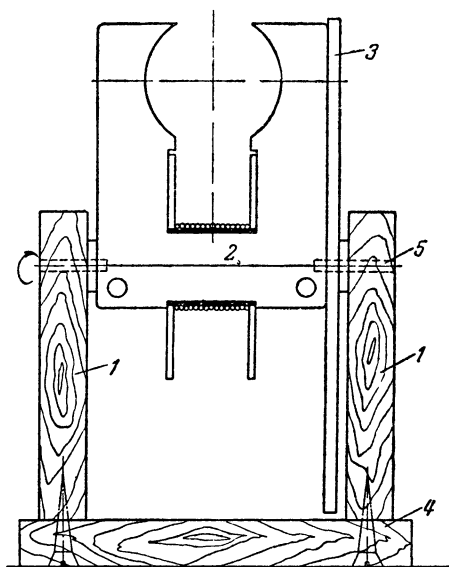


Рис. 6-23. Приспособление для намотки катушки.

1 — стойка; 2 — статор; 3 — диск из фанеры; 4 — основание приспособления; 5 — штифы.

мажным ярлычком с обозначением номера сотни. Это избавит от необходимости разматывать всю катушку, если при намотке сбились со счета витков.

#### 6-14. Статор асинхронного двигателя с равномерно распределенной обмоткой

После вырубki кружков для ротора остаются заготовки квадратной формы для листов статора. Их нужно собрать в стопку так, чтобы внутреннее отверстие статора было ровным и гладким. Для этого воспользуемся цилиндрической оправкой 1, выточенной из стали. Предварительно листы статора надо покрыть с обеих сторон тонким слоем клея БФ-2 и подсушить на воздухе. На торцах статора ставят листы из картона толщиной 1 мм. Для прес-

совки сердечника статора надо приготовить две стальные пластины 2 толщиной 8 мм (рис. 6-24). В углах пластин надо просверлить отверстия диаметром 8,5 мм для шпилек 3 с резьбой 8 мм. В каждой пластине должно быть просверлено в центре отверстие такого диаметра, чтобы

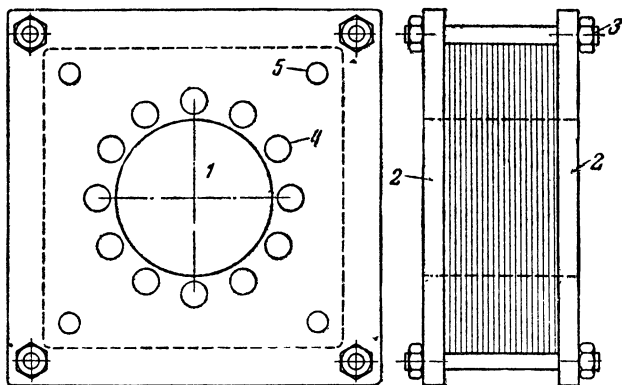


Рис. 6-24. Приспособление для прессовки статора.  
1 — оправка; 2 — пластина; 3 — шпилька; 4 — паз статора; 5 — отверстие в статоре.

пластина плотно охватывала оправку для сборки листов статора. На верхней пластине надо разметить острой закаленной иглой пазы статора 4 и четыре отверстия 5 по углам листов статора, которые будут служить для крепления двигателя к основанию и для крепления подшипников. Собранный пакет затянуть шпильками и положить в печь или духовку для запекания клея. Температура в печи должна быть такая, чтобы бумага обугливалась, но не загоралась. После выемки из печи можно дрелью или на сверлильном станке просверлить пазы и отверстия в углах. По окончании сверления можно осторожно выбить оправку из отверстия статора. Внутреннюю поверхность отверстия статора надо тщательно очистить от сгустков клея наждачной бумагой. Прорези пазов, в которые будут вкладываться проводники обмотки, пропиливают ножовкой, а края прорезей опиливают тонким напильником от острых заусенцев, которые могут повредить изоляцию проводников. Затем надо отвинтить гайки на шпильках и снять прессующие планки.

Изоляция пазов производится так же, как было описано в § 6-7.

Теперь можно приступить к обмотке статора.

Катушки обмотки наматывают на цилиндрические шаблоны и затем вкладывают в пазы статора. Для определения периметра шаблона надо вложить в пазы один виток катушки, а затем распрямить его и измерить линейкой.

На рис. 6-25 показана схема обмотки статора двигателя с пусковой обмоткой, расчет которого был произведен в § 5-10. Статор имеет 12 пазов. Рабочая обмотка зани-

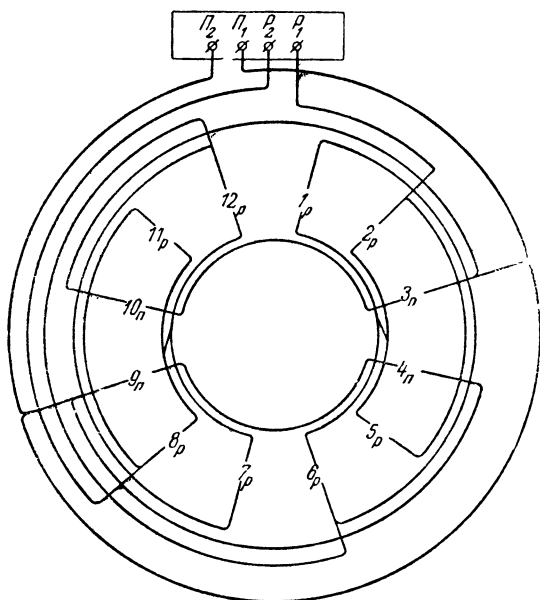


Рис. 6-25. Схема обмотки статора.

мает пазы 1, 2, 5, 6, 7, 8, 11 и 12, а пусковая обмотка пазы 3, 4, 9 и 10. На схеме пазы обозначены цифрами, а торцовые части обмотки и соединения между катушками — дугами. Соединения с одного торца статора условно показаны дугами внутри отверстия статора, а соединения с противоположного торца статора — дугами снаружи статора. В действительности эти соединения расположены на торцах статора, не выходя из них ни внутрь, ни наружу.

Сначала вкладываем катушку, стороны которой расположены в пазах 2 и 5. Затем вкладываем катушку в пазы 1 и 6 и конец первой катушки соединяем с нача-

лом второй. Начало первой катушки из паза 2 присоединяем к зажиму, обозначенному на дощечке  $P_1$ , а конец катушки из паза 6 будет соединен с выводом из паза 12.

Аналогично вкладываем вторую группу катушек рабочей обмотки сначала из паза 8 в паз 11, а затем из паза 7 в паз 12 и соединяем их между собой. Вывод из паза 8 соединяем с зажимом  $P_2$  на дощечке.

Теперь осталось вложить в пазы пусковую обмотку, которая также состоит из двух катушек. Первая катушка вкладывается в пазы 10 и 3, а вторая — в пазы 4 и 9. Концы катушек соединяются между собой, а начала приключаются к зажимам на дощечке, обозначенным буквами  $P_1$  и  $P_2$ .

### 6-15. Подшипники

Шейки вала ротора вращаются в подшипниках. В двигателях малой мощности применяются подшипники скольжения и подшипники качения (шарикоподшипники). Шарикоподшипники изготавливаются на специальных подшипниковых заводах. Размеры их определяются стандартом ОСТ6121. В табл. 6-1 приведены размеры шарикоподшипников.

Шарикоподшипники имеют меньшие потери на трение и более устойчивы на износ, но требуют более точной обработки шейки вала и отверстия в корпусе. Кроме того, недостаток их заключается в том, что при больших скоростях вращения шарикоподшипники издадут сильный свистящий шум, неприятно действующий на слух. Поэтому в самодельных двигателях лучше применять подшипники скольжения.

Таблица 6-1

Размеры шарикоподшипников

Номер подшипника	Размеры, мм		
	$d$	$D$	$b$
4	4	16	5
5	5	19	6
6	6	19	6
7	7	22	7
8	8	22	7
9	9	21	8

Подшипник скольжения состоит из латунной или бронзовой втулочки, которая надевается на шейку вала. Шейка должна свободно вращаться в отверстии втулки, однако



зазор между отверстием втулки и валом не должен быть очень большим. Устройство подшипника скольжения показано на рис. 6-26. Втулка 1 зажата между двумя планками 2 и 3 из листовой латуни или стали. Наружная часть втулки выточена в виде шара. В планках выдавлены углубления также шаровой формы. Благодаря этому втулка всегда устанавливается по оси шейки вала 4, благодаря чему перекоса между втулкой и валом не может быть. В верхней части втулки просверлено отверстие 5, через которое при помощи масленки от швейной машины в подшипник периодически добавляют несколько капель масла.

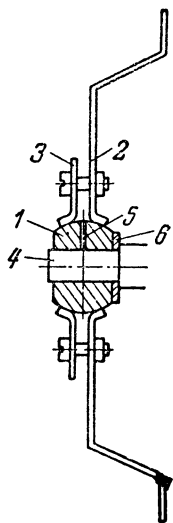


Рис. 6-26. Подшипники двигателя.

1 — втулка подшипника; 2 и 3 — планки; 4 — шейка вала; 5 — отверстие для смазки; 6 — упорная шайба.

У самых маленьких двигателей концы вала 1 можно заточить на конус и вставить в конические углубления в латунных пластинках 2. При этом шкив 3 помещается на валу между ротором 4 и подшипником (рис. 6-27).

В некоторых механизмах, например в электропроигрывателях, ротор устанавливается вертикально. Тогда, кроме цилиндрических направляющих подшипников, нужен еще подпятник, на который будет опираться ротор. Самой простой и надежной конструкцией подпятника является шариковый подпятник (рис. 6-28). Торцевая часть вала 1 опирается на стальной закаленный шарик 2 от велосипедного подшипника, который углублен в плитке 3. Потери на трение в таком подшипнике ничтожны.

В некоторых механизмах, например в электропроигрывателях, ротор устанавливается вертикально. Тогда, кроме цилиндрических направляющих подшипников, нужен еще подпятник, на который будет опираться ротор. Самой простой и надежной конструкцией подпятника является шариковый подпятник (рис. 6-28). Торцевая часть вала 1 опирается на стальной закаленный шарик 2 от велосипедного подшипника, который углублен в плитке 3. Потери на трение в таком подшипнике ничтожны.

Торцевая часть вала 1 опирается на стальной закаленный шарик 2 от велосипедного подшипника, который углублен в плитке 3. Потери на трение в таком подшипнике ничтожны.

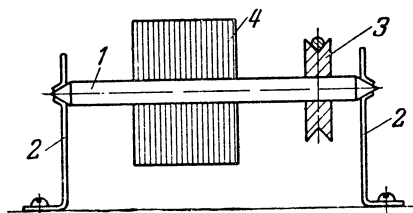


Рис. 6-27. Конические подшипники.  
1 — вал; 2 — латунная пластинка; 3 — шкив; 4 — ротор двигателя.

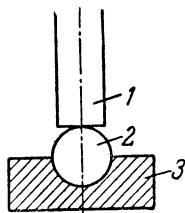


Рис. 6-28. Подпятник.

## 6-16. Асинхронный двигатель заводского изготовления

На рис. 6-29 показан продольный разрез асинхронного двигателя заводского изготовления.

Ротор двигателя *1* собран на оправку, и в пазы его залит расплавленный алюминий, образующий стержни и замыкающие кольца с крылышками для охлаждения. На валу под посадку ротора сделаны продольные выступы,

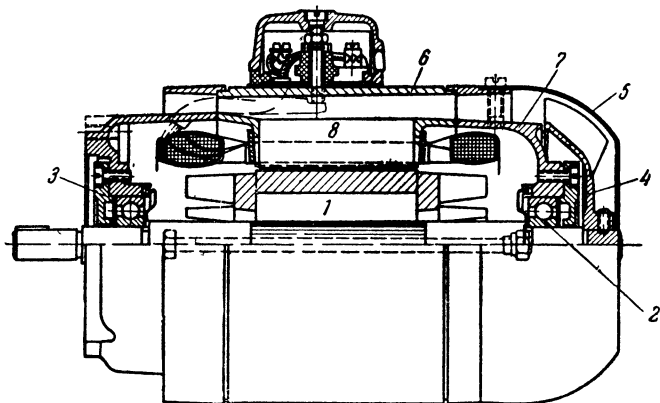


Рис. 6-29. Асинхронный двигатель заводского изготовления.

- 1* — ротор; *2* — шариковый подшипник; *3* — крышка подшипника; *4* — вентилятор;  
*5* — колпак вентилятора; *6* — корпус двигателя; *7* — крышка двигателя;  
*8* — статор с обмоткой.

которые называются рифлением вала. Рифление делают, прокатывая вал между зубчатыми планками из твердой стали; зубцы их вдавливаются в вал, и между ними образуются выступы для насадки ротора. На шейки вала надеты в нагретом состоянии шарикоподшипники *2*. При нагреве в горячем масле отверстия в кольцах увеличиваются и они легко находят на шейки вала. После остывания отверстия уменьшаются, и кольца будут плотно охватывать шейки вала. Снаружи подшипники закрываются крышками *3*, отлитыми из алюминия. Наружные кольца шарикоподшипников вставлены в отверстия, проточенные в крышках двигателя *7*.

Статор двигателя собирают из листов на внутренней цилиндрической оправке, затем вставляют в форму и снаружи заливают расплавленным алюминием. После затвердевания и остывания алюминий образует корпус двигателя *6*, представляющий собой трубу с продольными ребрами. Между ребрами образуются каналы, сквозь кото-

рые продувается охлаждающий воздух. Воздух прогоняется вентилятором 4, насаженным на конец вала двигателя. Он закрыт колпаком 5, который направляет воздух в каналы корпуса. Таким образом, двигатель охлаждается воздухом только снаружи, а его внутреннее пространство закрыто от окружающего воздуха при помощи стенок корпуса и крышек двигателя. На корпусе прикреплена дощечка с контактными винтами для присоединения обмотки статора.

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Область техники, занимающаяся применением электродвигателей для вращения различных механизмов, носит название электропривод. Все механизмы можно разделить на скоростные, у которых скорость вращения такая же, как и у самого двигателя, и тихоходные, которые вращаются со значительно меньшей скоростью. Поэтому между электродвигателем и механизмом включается так называемый редуктор, понижающий число оборотов. Из механики известно, что при уменьшении скорости увеличивается сила. Поэтому вращающий момент после редуктора повышается. Редуктор выполняется из шестерен. Вместо редуктора можно применять передачи или фрикционного типа с резиновыми шкивами, или при помощи гибкой связи шкивов различных диаметров, которая осуществляется через шнуры, резиновые кольца или витые пружины из проволоки. Для самостоятельного изготовления наиболее простыми являются передачи с гибкой связью.

Сначала рассмотрим примеры скоростных механизмов.

#### 7-1. Вентилятор

Вентилятор применяется для создания воздушного потока для охлаждения нагретых тел; например, все крупные электрические машины снабжены вентилятором для отвода тепла, выделяемого в частях машины вследствие потерь энергии. В домашних условиях вентилятор служит для создания искусственного ветра в жаркую погоду. Так как воздушный поток вентилятора растет с увеличением скорости вращения, нет смысла соединять его с двигателем через понижающий редуктор. Пропеллер вентилятора надевается на конец вала двигателя.

Момент, необходимый для вращения пропеллера, пропорционален квадрату скорости. Поэтому, чтобы стронуть с места и медленно разогнать пропеллер до наибольшей скорости, от электродвигателя не требуется большого вращающего момента. Для вентиляторов почти всегда применяются асинхронные однофазные двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе (§ 4-3), так как они устроены проще других асинхронных двигателей. Настольный вентилятор укрепляется на стойке 1, которая должна иметь соответствующие размеры и вес, чтобы электродвигатель не опрокинул ее (рис. 7-1). Для направления воздушного потока выше или ниже соединение двигателя со стойкой выполняют в виде шарнира 2. Для защиты от повреждений и придания вентилятору красивого вида желательнее двигатель заключить в коробочку 3, изготовленную из жести или спрессованную из пластмассы.

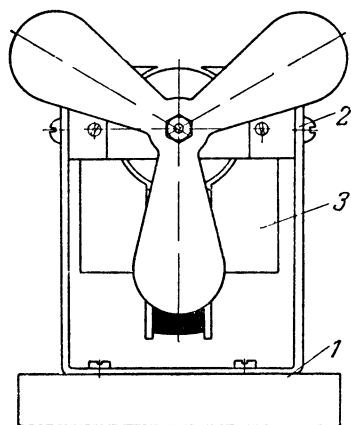


Рис. 7-1. Настольный вентилятор.

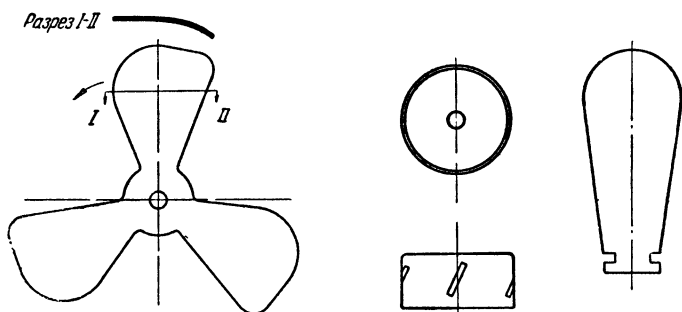


Рис. 7-2. Формы крыльев вентилятора.

В обеих стенках коробочки надо прорезать отверстия. Через них пропеллер будет прогонять воздух, который необходим для охлаждения двигателя.

Если обмотка статора двигателя выполнена с соблюдением всех требований, указанных в § 6-13, то можно

двигатель питать непосредственно от осветительной сети через шнур с вилкой на конце.

Пропеллер можно сделать или из жести (рис. 7-2), или из резиновых лопастей, вставленных в прорези жестяной чашки (рис. 7-2). Пропеллер из жести надо оградить неподвижным ободком из проволоки, так как быстро вращающийся пропеллер может поранить руку. Направление выгиба лопастей должно быть согласовано с направлением вращения, как это показано на рис. 7-2. Не надо давать слишком большого наклона лопастям, так как это создает большую нагрузку на двигатель: он снизит скорость вращения, и количество воздуха уменьшится.

## 7-2. Стробоскоп

При работе асинхронного двигателя желательно измерить скорость вращения ротора. У больших двигателей скорость измеряют тахометром (рис. 7-3), представляю-

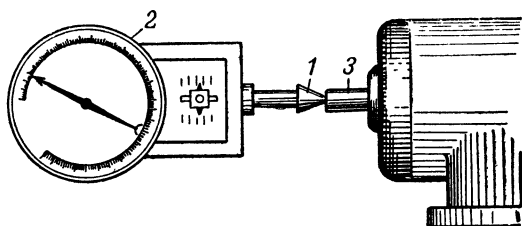


Рис. 7-3. Тахометр.

щим собой прибор в форме часов, имеющий конец вала с резиновым наконечником 1 и циферблат со стрелкой 2. Наконечник прижимают к стенкам отверстия в торце вала двигателя 3, а стрелка показывает на циферблате число оборотов двигателя. Но для вращения механизма тахометра нужна некоторая мощность. Если соединить двигатель мощностью в несколько ватт с тахометром, то он будет вращаться очень медленно, а возможно и вообще не тронется с места. Есть другой способ измерения скорости вращения ротора. Для этого на конец вала надевают диск 1 из плотной бумаги (рис. 7-4). На диске наносят тушью черные секторы 2 по числу полюсов двигателя. При работе двигателя 3 диск освещают неоновой лампой 4 пятакového типа. Она имеет нормальный цоколь и может быть ввернута в патрон 5. Неоновая лампа, включенная в сеть переменного тока с частотой 50 пер/сек, будет вспы-

хивать 100 раз в секунду при прохождении переменного тока через максимальные значения. Если ротор вращается со скоростью 3 000 об/мин, или 50 об/сек, то при каждой вспышке лампы секторы диска будут в одном и том же положении и потому будут казаться неподвижными.

В действительности же ротор асинхронного двигателя несколько отстает от скорости вращения магнитного поля и делает около 2 900 об/мин. Поэтому в свете неоновой лампы диск будет казаться вращающимся, но не с пол-

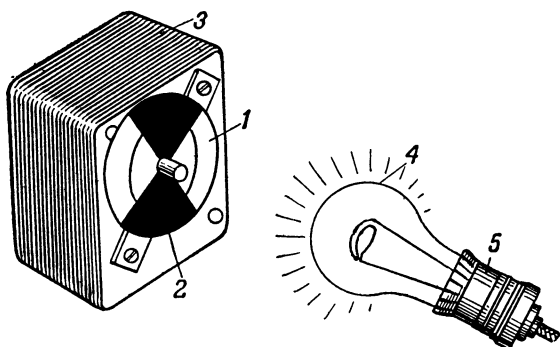


Рис. 7-4. Стробоскоп.

ной скоростью, а с разностью скоростей между синхронной скоростью и действительной скоростью ротора. Возьмите часы с секундной стрелкой и посчитайте, сколько черных секторов пробежит за 30 сек. Допустим, что вы насчитали число секторов  $m=60$ . Теперь подставьте это число в формулу  $s = \frac{m}{15} = \frac{60}{15} = 4\%$ , где  $s$  — скольжение ротора, в процентах, а число оборотов можно рассчитать по формуле  $n = 3\,000 - 0,04 \cdot 3\,000 = 2\,880$  об/мин. Измерив число оборотов один раз при холостом ходе, а другой раз притормозив ротор тормозом, вы увидите, что с увеличением нагрузки скорость вращения ротора снижается.

Если производить наблюдения над коллекторным двигателем, то, изменяя подводимое к двигателю напряжение при помощи реостата, можно добиться скорости, при которой диск будет казаться неподвижным. Если увеличить напряжение и скорость вращения двигателя, то диск будет вращаться в одну сторону, а если уменьшить число оборотов, то диск будет вращаться в другую сторону.

### 7-3. Фрикционная передача

Рассмотрим несколько примеров применения двигателя с фрикционной передачей, основанной на трении. На конце вала 1 двигателя надо закрепить шкивок с резиновым ободом. Это можно сделать, вырезав из толстой листовой резины кружок 2 или надев на желобок шкива резиновое колечко 3 (рис. 7-5). Если прижимать резиновый обод на конце вала двигателя к цилиндрической или плоской части диска 4, надетого на ось, то он начнет вращаться. Скорость вращения диска будет во столько раз меньше скорости вращения ротора двигателя, во сколько

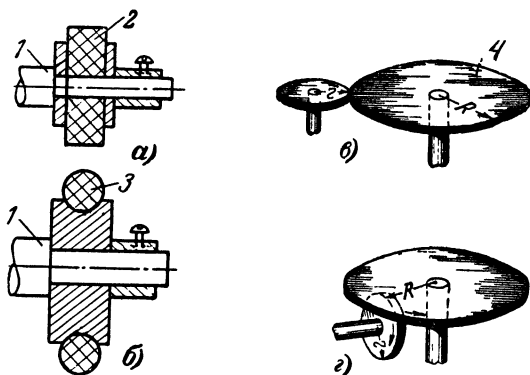


Рис. 7-5. Фрикционная передача.

радиус диска  $R$  больше радиуса  $r$  резинового обода двигателя. Отношение  $\frac{R}{r}$  называется передаточным числом передачи. При уменьшении скорости во столько же раз увеличивается вращающий момент. Теперь наш двигатель стал сильным и может поднимать предметы большего веса, чем он сам.

Если шкивок двигателя прижимается к цилиндрической поверхности приводимого во вращение диска (рис. 7-5, б), то передаточное число остается постоянным. Если же шкивок прижимается к плоской поверхности диска (рис. 7-5, в), то передаточное число можно регулировать, передвигая двигатель вдоль радиуса диска. Если точка касания шкива с диском будет на диске равна радиусу шкива, то диск будет вращаться с той же скоростью, что и ротор двигателя.

#### 7-4. Привод швейной машины

Для вращения обода швейной машины нужен двигатель мощностью около 15 *вт* при скорости вращения 2900 *об/мин*. Чтобы он быстро разгонял машину, требуется двигатель с массивным ротором или коллекторный двигатель.

Для установки его на ручной машине отвертывают винт, крепящий ручную передачу к корпусу машины, двигатель прикрепляют к угольнику 1 (рис. 7-6) из листового железа толщиной 1,5—2 *мм*. В угольнике просверливают отверстие для крепления его к корпусу машины винтом 2.

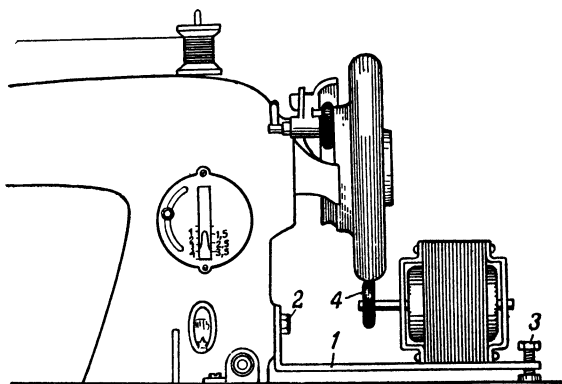


Рис. 7-6. Привод швейной машины.

На конце угольника нарезают отверстие и ввертывают в него винт 3. Подвертывая винт отверткой, можно регулировать нажатие шкива двигателя 4 на обод маховика машины.

Чтобы швейная машина не рвала нитку, двигатель должен пускаться плавно, что можно сделать при помощи реостата, постепенно увеличивая подводимое к двигателю напряжение. У двигателей заводского изготовления напряжение регулируется при помощи угольного регулятора, состоящего из тонких угольных кружочков, которые включены последовательно с двигателем. При нажатии на ножную педаль кружочки сжимаются, электрическое сопротивление их уменьшается, и двигатель увеличивает скорость вращения.

Затруднение в изготовлении такого регулятора заключается в отсутствии угольных кружочков. Поэтому при-



дется сделать реостат из тонкой проволоки, намотанной на фарфоровую трубку 1. Проволока должна обладать большим сопротивлением. Ее можно навить из спирали для электрических плиток. По спирали должен передвигаться ползунок 2 из твердой латуни или бронзы (рис. 7-7).

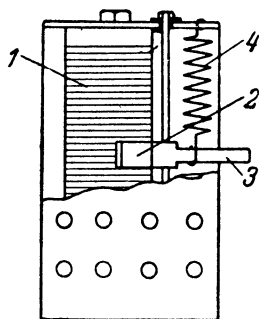


Рис. 7-7. Регулировочный реостат.

Реостат включается последовательно с двигателем. При пуске двигателя вся спираль должна быть включена. По мере передвижения ползунка длина включенной спирали уменьшается, напряжение, подводимое к двигателю, увеличивается, и он повышает скорость вращения. Для управления реостатом надо пристроить ножную педаль 3 с пружиной 4. Под действием пружины реостат включается, а при нажатии ноги постепенно выключается. Нельзя забывать, что реостат при работе нагревается. Поэтому для

предохранения от ожогов ноги, от загорания платья и от поражения электрическим током его надо закрыть коробкой из листового железа. В коробке должны быть сделаны отверстия для охлаждения спирали. В коллекторном двигателе реостат включается последовательно с двигателем. В асинхронных двигателях с массивным ротором реостат включается в цепь рабочей обмотки.

## 7-5. Электропроигрыватель

Фрикционная передача применяется и для вращения диска электропроигрывателя. У покупных дисков имеется обод 1, который приводится во вращение от стального шкива двигателя 2 (рис. 7-8).

Для улучшения сцепления между шкивом и диском помещается промежуточный шкивок 3 с резиновым ободом. Однако он не изменяет передаточного числа передачи, поэтому его называют паразитным. Отношение скоростей вала двигателя и диска будет определяться отношением радиусов диска и шкива двигателя.

К двигателю для проигрывателя предъявляются высокие требования бесшумности работы и постоянства скорости вращения при колебаниях напряжения. Поэтому не огорчайтесь, если при первых опытах применения само-

дельных двигателей будут слышаться шумы, и музыка будет с завываниями вследствие неравномерности хода диска. Получить удовлетворительные результаты можно только путем кропотливой работы над улучшением качества двигателя и передачи.

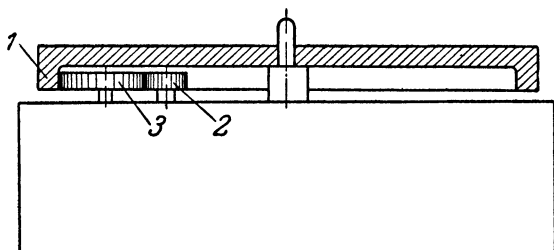


Рис. 7-8. Привод электропроигрывателя.

Теперь перейдем к двигателям с гибкой передачей. Они широко применяются для приведения в движение различных моделей и электрифицированных игрушек.

### 7-6. Электролебедка

Лебедки применяются во всех грузоподъемных механизмах. Электролебедка представляет собой двигатель с пристроенным к нему редуктором. Для настоящих кранов редуктор выполняется из шестерен, для привода моделей и игрушек можно применить передачу с гибкой связью.

На рис. 7-9 показана конструкция электролебедки, которая объединена с двигателем. Она состоит из двух боковин 1, которые можно взять из деталей «механического конструктора». Впрочем их нетрудно сделать и самому из листовой стали толщиной от 0,6 до 1 мм. В четыре отверстия проходят шпильки 2, скрепляющие статор двигателя. Боковины служат также для закрепления подшипников двигателя, состоящих из латунных или бронзовых втулочек 3, для которых в боковинах просверлены отверстия. Если это коллекторный двигатель, то его надо сделать с торцовым коллектором (§ 6-8). Тогда щеткодержатели будут укрепляться в отверстиях тех же боковин, как показано на рис. 6-17. Кроме этих отверстий, в боковинах просверлено еще много равномерно расположенных отверстий 4, которые служат для осей шкивов передачи

и для крепления к лебедке других деталей модели. Шурупами, проходящими через отверстия 5 в нижней полке боковины, вся лебедка крепится к деревянному основанию. Для полного совпадения отверстий в обеих боковинах надо при изготовлении сложить их вместе и сверлить оба отверстия совместно. Отверстия для осей шкивов должны быть на 0,1 мм больше диаметра оси. В таких отверстиях оси шкивов могут вращаться без латунных втулок. Отверстия для шпилек, крепящих статор, должны быть примерно на 0,5 мм больше диаметра шпилек. Это надо для того, чтобы, передвигая статор, можно было регулировать равномерность зазора между ротором и статором.

На рис. 7-9 показана схема двухступенчатой передачи, состоящей из шкивов с радиусами  $R$  и  $r$ . Общее переда-

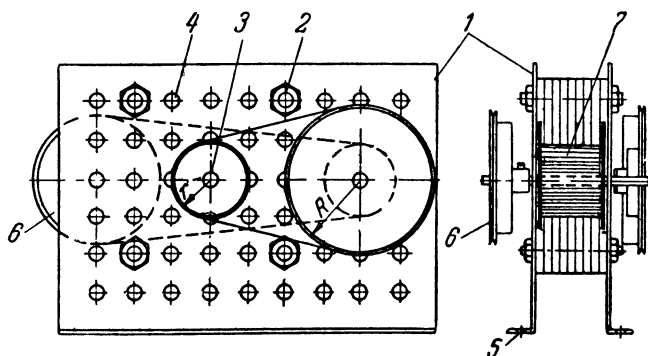


Рис. 7-9. Электралебедка.

точное число передачи равно произведению передаточных чисел отдельных ступеней. Его можно определить по формуле, в которой в числителе будут радиусы больших шкивов, а в знаменателе радиусы малых шкивов,

$$i = \frac{R_1 R_2}{r_1 r_2}.$$

Если большие шкивы будут иметь радиусы 3 см, а малые 1 см, то передаточное число редуктора будет 9. Это значит, что шкив 6 будет вращаться в 9 раз медленнее, чем ротор двигателя. Во столько же раз возрастет момент на валу.

Шкивы должны иметь желобки для гибкой связи. Такие шкивы имеются в наборах «механического конструктора».

тора». Их можно сделать и самому из двух кружочков с отогнутыми в разные стороны краями. Для насадки на ось шкив имеет втулочку со стопорным винтом, упирающимся концом в ось. На оси шкива 6 между боковинами укрепляется барабан 7, на который при вращении будет наматываться нить, поднимающая груз.

Изготовив лебедку по рис. 7-9, можно применить ее для целого ряда действующих моделей.

### 7-7. Реверсор

Для многих моделей требуется изменение направления вращения двигателя. Так, подъемный кран должен поднимать и опускать грузы, электровоз должен двигаться вперед и назад. Изменение направления вращения называется реверсированием, а аппарат, при помощи которого производится изменение направления вращения двигателя, называется реверсором (рис. 7-10).

Чтобы изменить направление вращения коллекторного двигателя, надо изменить направление тока в обмотке возбуждения или в обмотке якоря. Реверсор (рис. 7-10) состоит из дощечки, на которой укреплены контактные кнопки. Щетки двигателя соединены с кнопками следующим образом.

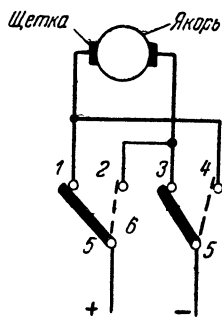


Рис. 7-10. Реверсор.

Левая щетка с кнопками 1 и 4, а правая с кнопками 2 и 3. Ток от источника подводится к двум пружинным пластинкам 6, которые вращаются вокруг неподвижных осей 5 и соединены между собой планкой из изоляционного материала. Когда пластинки стоят на кнопках 1 и 3, ток в якоре течет в одну сторону, а когда пластинки переводятся на кнопки 2 и 4, ток в якоре изменяет направление, и якорь будет вращаться в противоположную сторону.

Схема реверсирования асинхронного двигателя показана на рис. 4-10.

### 7-8. Подъемный кран

Для изготовления действующей модели подъемного крана надо к лебедке по рис. 7-9 привинтить ферму, состоящую из нескольких планок деталей «механического конструктора». Чтобы не делать большой и сложной фер-

мы, можно кран поместить на краю стола и поднимать им различные предметы с пола на стол (рис. 7-11). Лебедка прикрепляется к деревянному кругу 1, который может поворачиваться относительно бруска 2, представляющего собой основание крана. Поворот крана можно сделать ручным при помощи гибкой связи 3 между кругом и

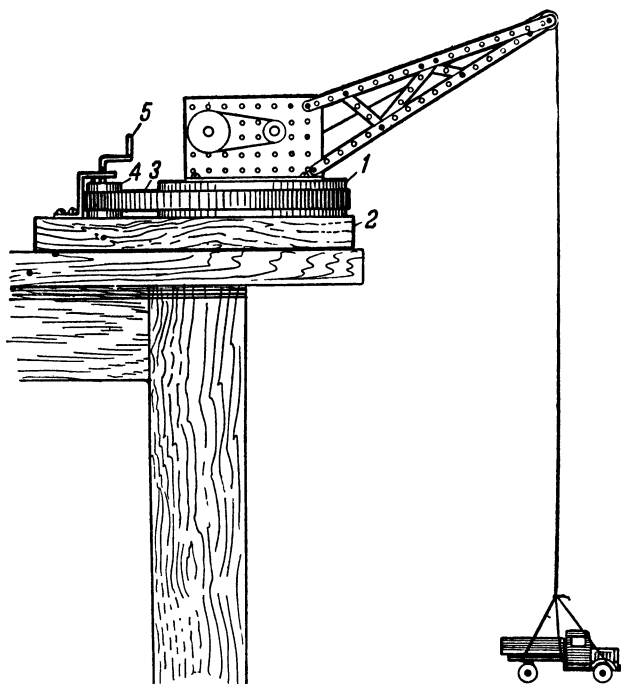


Рис. 7-11. Подъемный кран.

шкивом 4, приводимым во вращение рукояткой 5. Но еще интересней сделать привод от второго электродвигателя. Тогда можно всеми движениями крана управлять на расстоянии, не прикасаясь к нему руками. Основание крана следует прикрепить к столу струбциной, иначе при подъеме тяжелых предметов кран опрокинется. Струбцину можно заменить грузом, положенным на основание, который будет играть роль противовеса. Управлять двигателем можно при помощи реверсора, у которого должно быть три положения: вверх, стоп и вниз. При работе крана наибольшее усилие двигатель развивает при пуске, когда на-

до поднимаемому грузу сообщить ускорение. Поэтому нужен двигатель с большим пусковым моментом. В качестве такого двигателя может быть применен коллекторный или однофазный асинхронный с массивным ротором. Ввиду того, что подводка к двигателю производится по гибким шнурам с легкой изоляцией, питание двигателей надо осуществить через понижающий трансформатор при напряжении 12 в.

### 7-9. Троллейбус

Наиболее простой моделью электрического подвижного состава является модель троллейбуса (рис. 7-12), так как она не связана с рельсами, изготовление которых представляет большие трудности. В качестве простейшего движущего механизма можно использовать ту же лебедку. К нижним полкам боковин надо привернуть четыре угольника с отверстиями и пропустить через них оси колес.

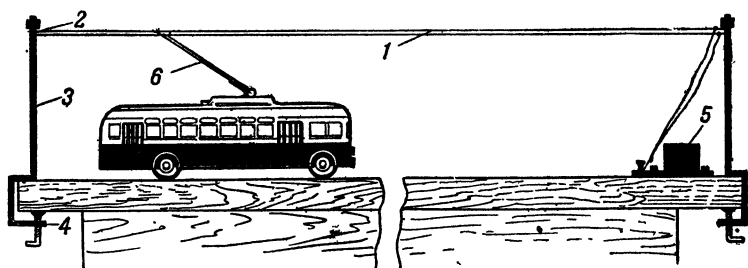


Рис. 7-12. Модель троллейбуса.

Одну из осей при помощи шкивов и гибкой связи надо соединить с барабаном лебедки. На лебедку надо надеть кузов троллейбуса.

Питающие провода 1 из голой медной проволоки натягиваются между двумя изоляционными планками 2, укрепленными на стойках 3 из железной проволоки. Стойки крепятся к краям стола при помощи струбцинок 4. Ток напряжением 12 в подводится к проводам от понижающего трансформатора 5.

Передача тока к двигателю производится через две штанги 6 из толстой медной проволоки, шарнирно закрепленные на поперечине из изоляционного материала, которая опирается на боковины лебедки. От штанг к зажимам двигателя ток поступает по гибким изолированным проводам.

## ТРАНСФОРМАТОР ДЛЯ ПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для питания двигателей переменного тока, предназначенных для движущихся моделей (электровоз, троллейбус, подъемный кран) в целях безопасности применяется напряжение не выше 12 в. Для преобразования напряжения осветительной сети 220 или 127 в в низкое напряжение служит понижающий трансформатор. Такие трансформаторы имеются в продаже, но его нетрудно сделать самому. В этой главе приводятся расчет трансформатора, пример расчета и описание изготовления самодельного трансформатора.

### 8-1. Как работает трансформатор

На рис. 8-1 схематически показано устройство трансформатора. Он состоит из двух катушек 3 и 4 и железного сердечника 2. Катушка 3 называется первичной и присоединяется к осветительной сети. Другая катушка 4 называется вторичной и служит для подключения двигателя.

Как только включим первичную катушку в розетку осветительной сети 1, по ее виткам потечет переменный

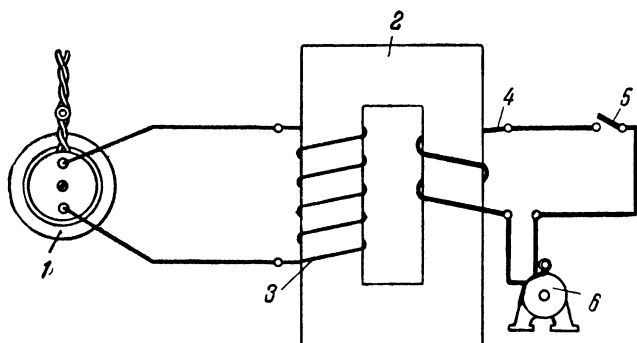


Рис. 8-1. Принципиальное устройство трансформатора.

1 — розетка; 2 — сердечник; 3 — первичная катушка; 4 — вторичная катушка;  
5 — рубильник; 6 — электродвигатель.

ток. Произведение числа витков на силу тока называется намагничивающей силой катушки. Первичная катушка создает магнитное поле, силовые линии которого замыкаются через железный сердечник. Магнитное поле в железном сердечнике будет примерно в 5000 раз больше,

чем в воздухе при том же токе катушки. Если бы не было железного сердечника, то размеры первичной катушки пришлось бы увеличить во много раз, чтобы создать такое же магнитное поле.

Магнитное поле будет меняться так же, как меняется переменный ток с частотой 50 *пер/сек*. При этом линии магнитного поля будут пронизывать витки обеих катушек и в них будут наводиться э. д. с., а на концах катушек появится напряжение. Но катушки имеют разные числа витков. Поэтому напряжение вторичной катушки  $U_2$  будет во столько раз меньше напряжения первичной катушки  $U_1$ , во сколько раз число витков вторичной катушки  $\omega_2$  меньше числа витков первичной катушки  $\omega_1$ . Это отношение называется коэффициентом трансформации  $k$

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

Здесь мы встречаемся с замечательным явлением, на принципе которого строятся многие электрические машины и аппараты. Хотя вторичная катушка и не соединена с первичной, в ней по закону индукции наводится э. д. с. Связь между катушками осуществляется через магнитное поле.

Пока мы рассматривали трансформатор с разомкнутым рубильником  $b$  в цепи вторичной катушки. Такое состояние трансформатора называется холостым ходом, потому что он не совершает никакой работы. Ток в первичной катушке является почти целиком реактивным током, создающим магнитное поле.

Теперь замкнем рубильник. Во вторичной катушке потечет ток, и двигатель  $b$  начнет вращаться. Таким образом, будет происходить передача энергии от первичной катушки к вторичной. Откуда возьмется эта энергия? Очевидно, она должна поступать из осветительной сети в первичную катушку. После замыкания рубильника ток в первичной катушке должен возрасти, так как теперь двигатель стал потреблять энергию. Связь между первичной и вторичной катушками совершается через магнитное поле сердечника. По закону Ленца ток во вторичной катушке всегда направлен противоположно току первичной катушки, поэтому он стремится размагнитить сердечник. Но как только начнет уменьшаться магнитный поток, произойдет уменьшение индуктивного сопротивления первичной катушки, и ток в ней по закону Ома увеличится. Таким образом, сум-



ма н. с. обеих катушек все время остается неизменной и равна н. с. первичной катушки при холостом ходе трансформатора, а магнитный поток также остается неизменным. Действительно, начнем тормозить якорь двигателя. Тогда будет расти потребляемый им ток, получаемый от вторичной катушки, и одновременно увеличится ток первичной катушки.

На рис. 8-1 первичная катушка состоит из пяти витков. Между тем в трансформаторах для сети 127 в число витков первичной катушки около 1 000, а для сети 220 в — около 1 600 витков. Для чего же требуется такое большое число витков? Дело в том, что индуктивное сопротивление катушки пропорционально квадрату числа витков. Если мы уменьшим число витков, то сильно возрастет сила тока в катушке и увеличится магнитный поток. Но для увеличенного потока потребуется сердечник с большим сечением. Таким образом, при расчете трансформатора медь катушек и железо сердечника могут заменять друг друга. Если взять большое число витков, то можно снизить сечение сердечника, и, наоборот, при уменьшении числа витков необходимо увеличивать сечение сердечника.

Мощность, забираемая из сети первичной катушкой, несколько больше мощности в цепи вторичной катушки. Разность мощностей идет на покрытие потерь в трансформаторе.

## 8-2. Конструкция

Трансформатор состоит из двух основных частей: катушек и сердечника. В процессе изготовления сначала на жесткий каркас наматывают катушки, а затем в отверстие каркаса вдвигают листы сердечника. На рис. 8-1 первичная и вторичная катушки трансформатора условно показаны на разных сторонах сердечника для удобства объяснения принципа работы. В действительности трансформаторы так не делают, потому что между катушками будет плохая связь через магнитное поле, и большое число силовых линий будет замыкаться через воздух. Поэтому обе катушки помещают на одной стороне сердечника (рис. 8-2). Часть сердечника, на которую надета катушка, называется стержнем. Если катушки намотаны на общем каркасе, то сначала наматывают первичную катушку, а затем вторичную, отделенную от нее слоями изоляции. Если каждая катушка наматывается на свой каркас, то их располагают на сердечнике одну над другой.

В трансформаторах заводского изготовления сердечник собирается из штампованных листов П-образной или Ш-образной формы. Для самодельного трансформатора

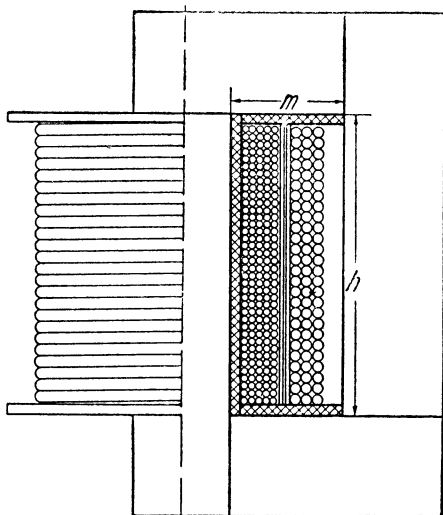


Рис. 8-2. Конструкция трансформатора.

изготовление таких листов представляет большие трудности. Поэтому сердечник изготовляют из прямоугольных пластин толщиной 0,5—0,7 мм, которые можно нарезать из обычного кровельного железа (рис. 8-2).

Для уменьшения потерь от вихревых токов пластины оклеивают с одной стороны папиросной бумагой или покрывают слоем лака при помощи кисти.

Еще легче сделать спиральный сердечник (рис. 8-3) из полос тонкой жести, которые можно нарезать из консервных банок обыкновенными ножницами. Он

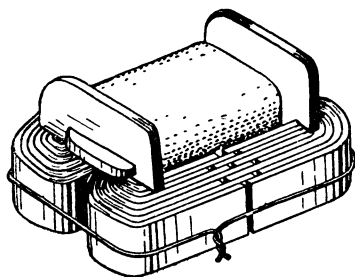


Рис. 8-3. Трансформатор со спиральным сердечником.

имеет ряд преимуществ перед сердечником, показанным на рис. 8-2. Во-первых, благодаря меньшей толщине листов снижаются потери от вихревых токов, во-вторых, каждая

полоска имеет только один, а не четыре стыка, которые образуются между прямоугольными пластинами. Вследствие этого уменьшаются магнитное сопротивление сердечника и ток первичной катушки, который создает магнитный поток.

### 8-3. Расчет

Для расчета трансформатора надо задаться его мощностью. Трансформатор должен быть рассчитан не на номинальную мощность двигателя, а на потребляемую им мощность, которая всегда больше номинальной. Зависимость между этими величинами выражается формулой

$$S = \frac{P}{\eta \cos \varphi} [va], \quad (8-1)$$

где  $S$  — мощность трансформатора,  $va$ ;

$P$  — номинальная мощность двигателя,  $вт$ ;

$\eta$  — к. п. д. двигателя;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности двигателя.

Зависимость между мощностью трансформатора и его размерами определяется по следующей формуле:

$$CF = \frac{S [1 + \eta] 10^4}{B^2 \eta k_{\mu} \Delta} [cm^4]. \quad (8-2)$$

Разберем значения величин, входящих в эту формулу.

$S$  — площадь сечения стержня трансформатора. Сечение стержня имеет форму прямоугольника. Площадь сечения можно определить по формуле

$$C = abk_c [cm^2]. \quad (8-3)$$

В этой формуле  $a$  и  $b$  — размеры сторон сечения стержня в сантиметрах, а коэффициент  $k_c$  выражает плотность заполнения сечения сталью. Этот коэффициент учитывает изоляцию листов и воздушные промежутки между ними.

Значения коэффициентов заполнения сердечника можно брать из табл. 8-1.

В табл. 8-1 заполнены не все строки, так как спиральный сердечник трудно гнуть из листов толще 0,2 мм, а сердечник из прямоугольных пластин толщиной менее 0,5 мм будет слишком рыхлым.

$F$  — площадь окна сердечника трансформатора, т. е. произведение расстояния между стержнями  $m$  на высоту

Коэффициенты заполнения сердечника

Конструкция сердечника	Коэффициент $k_c$ при толщине листов, мм		
	0,5	0,35	0,2
Из штампованных П-образных или Ш-образных листов заводского изготовления . . . . .	0,9	0,85	—
Из самодельных прямоугольных пластин . . . . .	0,85	—	—
Спиральный сердечник из полос . . . . .	—	—	0,75

стержня  $h$  в сантиметрах (рис. 8-2). В окне трансформатора помещаются катушки.

В числителе и знаменателе правой части формулы мы встречаем знакомую из расчета двигателей греческую букву  $\eta$ , которая обозначает к. п. д. трансформатора. При расчетах можно принять  $\eta=0,75$ .

$B$  — индукция в сердечнике трансформатора. Чем бóльшая индукция взята при расчете, тем меньше будут размеры сердечника, но тогда возрастут потери энергии в сердечнике и потребуются бóльший ток, чтобы создать магнитный поток. При расчетах возьмем индукцию 10 000 гс.

$k_m$  — коэффициент заполнения площади окна трансформатора медными проводниками. Этот коэффициент всегда меньше единицы, так как между сечениями круглых проводников остаются воздушные промежутки. Кроме того, часть площади окна занимают стенка каркаса, изоляционные прослойки между катушками и изоляция самих проводников. При расчетах трансформаторов будем принимать  $k_m=0,3$ . Это означает, что в площади окна сердечника сумма сечений медных проводников составляет 30%.

Последняя величина, стоящая в знаменателе формулы (8-2),  $\Delta$  — плотность тока в обмотках трансформатора. Очевидно, что чем бóльшую плотность тока мы будем брать, тем меньше будет сечение проводников. Но при увеличении плотности тока возрастет нагрев катушек. Плотность тока в обмотках трансформатора берется значительно меньше, чем в обмотках двигателей. Это объяс-

няется тем, что катушки трансформатора неподвижны и потому значительно хуже охлаждаются при работе. Кроме того, по сравнению с двигателями в катушках трансформатора сосредоточено много витков, которые при нагреве катушки подогревают друг друга. При расчетах будем принимать плотность тока в первичной катушке  $\Delta_1 = 2 \text{ а/мм}^2$ , а во вторичной катушке  $\Delta_2 = 3 \text{ а/мм}^2$ . Увеличенная плотность тока во вторичной катушке объясняется тем, что она имеет меньше витков и расположена снаружи, а следовательно, лучше охлаждается.

Подставив числовые значения букв в правую часть формулы, можно произвести указанные в формуле действия и получить одно число. Таким образом, узнаем, чему равно произведение  $CF$ . Для определения значений каждой из этих величин воспользуемся соотношением между мощностью трансформатора и сечением сердечника. Оно выражается следующей формулой:

$$C = \sqrt{S} [см^2]. \quad (8-4)$$

Теперь можно рассчитать и площадь окна:

$$F = \frac{CF}{C} [см^2]. \quad (8-5)$$

Размеры окна  $m$  и  $h$  можно определить из условия, что высота окна  $h$  примерно в 2—3 раза больше ширины окна  $m$ .

Величины  $C$  и  $F$  определяют все размеры сердечника. Теперь можно перейти к расчету катушек трансформатора, т. е. чисел витков и диаметров провода.

Число витков первичной катушки можно определить по формуле

$$\omega_1 = \frac{U_1 10^6}{2 [BC + 100 l_1 \Delta_1]} [\text{витков}], \quad (8-6)$$

где  $\omega_1$  — число витков первичной катушки;

$U_1$  — напряжение осветительной сети,  $v$ ;

$B$  — индукция в сердечнике,  $гс$ ;

$C$  — сечение сердечника,  $см^2$ ;

$l_1$  — длина среднего витка катушки,  $см$ ;

$\Delta_1$  — плотность тока,  $а/мм^2$ .

Все величины, входящие в эту формулу, уже известны из формулы (8-2), кроме  $l_1$ . Как видно из рис. 8-4, длина витка катушки состоит из двух прямолинейных участков  $a$ ,

двух прямолинейных участков  $b$ , которые являются сторонами сечения сердечника, и четырех закруглений радиусом  $r$ . Если сложить эти четыре закругления, то получится полная окружность, развернутая длина которой равна  $2\pi r$ . Величину радиуса можно принять  $r = 0,25m$ , где  $m$  — ширина окна по рис. 8-2. Тогда длина среднего витка

$$l_1 = 2a + 2b + 2\pi r \text{ [см]}. \quad (8-7)$$

Число витков вторичной катушки можно подсчитать, зная коэффициент трансформации. Например, если делают трансформатор для понижения напряжения сети 120 в в низкое напряжение 12 в, то коэффициент трансформации будет равен

$$k = \frac{120}{12} = 10.$$

Число витков вторичной катушки должно быть в  $k$  раз меньше числа витков первичной катушки, т. е.

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{k} \text{ [витков]}. \quad (8-8)$$

Для определения диаметра провода вторичной катушки надо знать ток:

$$I_2 = \frac{S}{U_2} \text{ [а]}. \quad (8-9)$$

Сечение провода вторичной катушки

$$s_2 = \frac{I_2}{\Delta_2} \text{ [мм}^2\text{]}. \quad (8-10)$$

Полученное сечение является предварительным. Теперь надо по табл. 5-1 подобрать во втором столбце ближайшую величину сечения стандартного провода, а по первому столбцу этой же таблицы определить диаметр провода.

Ток первичной катушки определяется по аналогичной формуле, но при этом надо учесть, что часть тока затрачивается на покрытие внутренних потерь в трансформаторе и на создание магнитного потока. Поэтому ток первичной катушки вычисляется по формуле

$$I_1 = 1,1 \frac{S}{\eta U_1} \text{ [а]}. \quad (8-11)$$

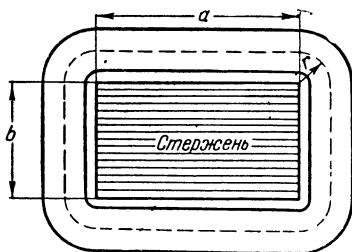


Рис. 8-4. Средний виток катушки.

Сечение провода первичной катушки

$$s_1 = \frac{I_1}{\Delta_1}. \quad (8-12)$$

Окончательное значение сечения и диаметр провода берем по табл. 5-1.

Если требуемые по расчету диаметры проводов надо заменить другими, то пользуемся теми же правилами, которые были изложены в § 5-6. Зная диаметры проводов, надо проверить, поместятся ли катушки в окне сердечника. Такая проверка проведена в примерах расчета трансформатора.

Если провода требуемого диаметра мало, то до намотки катушки надо проверить, хватит ли его для изготовления трансформатора. Расчет требуемого количества провода производится следующим образом. Умножаем длину среднего витка по формуле (8-7) на число витков в катушке. Разделив полученное число на 100, получим длину катушки в метрах. Зная по табл. 5-1 вес 100 м провода, легко определить вес провода для катушки и, взвесив имеющийся провод, узнать, хватит ли его для намотки катушки.

#### 8-4. Пример расчета

Для расчета трансформатора надо взять его номинальные данные, т. е. первичное напряжение  $U_1$ , вторичное напряжение  $U_2$  и мощность  $S$ .

Первичное напряжение надо взять таким, как в осветительной сети. Сети переменного тока для электрического освещения имеют два стандартных напряжения: 220 и 127 в. Какое напряжение в квартире, можно узнать по обозначенному на колбе электрической лампочки напряжению. Однако вследствие падения напряжения в проводке напряжение в квартирах обычно бывает несколько ниже стандартного. Поэтому при номинальном напряжении сети 220 в будем вести расчет на  $U_1 = 200$  в, а при напряжении 127 в — на  $U_1 = 120$  в.

Вторичное напряжение для питания двигателей лучше всего взять 12 в. Это и безопасно и достаточно для работы двигателя.

Мощность трансформатора определяем по формуле (8-1). Возьмем трансформатор для питания конденсаторного двигателя мощностью 10 вт при длительной работе. Для такого двигателя можно принять  $\eta = 0,31$  и  $\cos \varphi = 0,9$ . Тогда мощность трансформатора будет:

$$S = \frac{10}{0,31 \cdot 0,9} = 36 \text{ в}а.$$

При повторно-кратковременной работе такой трансформатор может питать двигатель мощностью до 15 вт.

Подставим в формулу (8-2) следующие числовые значения величин:

$$\eta = 0,75; B = 10\,000 \text{ гс}; k_m = 0,3; \Delta = 2,5 \text{ а/мм}^2$$

(средняя плотность тока между плотностями тока первичной и вторичной катушек):

$$CF = \frac{36(1 + 0,75)10^4}{10\,000 \cdot 2 \cdot 0,75 \cdot 0,3 \cdot 2,5} = 56 \text{ см}^4.$$

Сечение сердечника по формуле (8-4)

$$C = \sqrt[3]{36} = 6 \text{ см}^2.$$

По формуле (8-3) этому сечению соответствует сердечник с размерами сторон  $a = 4 \text{ см}$  и  $b = 2 \text{ см}$ , выполненный по рис. 8-3 при коэффициенте заполнения сталью  $k_c = 0,75$  по табл. 8-1.

$$C = 4 \cdot 2 \cdot 0,75 = 6 \text{ см}^2.$$

Площадь окна сердечника по формуле (8-5)

$$F = \frac{56}{6} = 9,3 \text{ см}^2.$$

Число витков первичной катушки по формуле (8-6)

$$\omega_1 = \frac{200 \cdot 10^6}{2[10\,000 \cdot 6 + 15,14 \cdot 2 \cdot 100]} = 1\,590 \text{ витков.}$$

В этой формуле длина среднего витка по формуле (8-7)

$$l_1 = 2 \cdot 4 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 = 15,14 \text{ см.}$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{200}{12} = 16,7.$$

Число витков вторичной катушки по формуле (8-8)

$$\omega_2 = \frac{1\,590}{16,7} = 95 \text{ витков.}$$

Ток вторичной катушки по формуле (8-9)

$$I_2 = \frac{36}{12} = 3 \text{ а.}$$

Сечение провода вторичной катушки по формуле (8-10)

$$s_2 = \frac{3}{3} = 1 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5-1 находим стандартное сечение  $s_2 = 1,057 \text{ мм}^2$ , которому соответствует диаметр провода  $d_2 = 1,16 \text{ мм}$ .

Ток первичной катушки по формуле (8-11)

$$I_1 = 1,1 \frac{36}{0,75 \cdot 200} = 0,26 \text{ а.}$$



Сечение провода первичной катушки по формуле (8-12)

$$s_1 = \frac{0,26}{2} = 0,13 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5-1 находим сечение стандартного провода  $s_1 = 0,132 \text{ мм}^2$ , которому соответствует диаметр  $d_1 = 0,41 \text{ мм}$ .

Проверяем коэффициент заполнения окна сердечника медью.

Общее сечение проводников первичной катушки	$0,132 \cdot 1590 = 210 \text{ мм}^2$
" " " вторичной "	$1,057 \cdot 95 = 100 \text{ мм}^2$
	Итого $310 \text{ мм}^2$

$$k_m = \frac{310}{930} = 0,33,$$

т. е. близок к принятому в начале расчета.

## 8-5. Изготовление

Здесь описан процесс изготовления трансформатора по расчету § 8-4.

Изготовление трансформатора начинается с каркаса для намотки катушек. Материалом для каркаса служит текстолит или гетинакс толщиной 2 мм. Если есть материал другой толщины, то соответственно должны быть изменены некоторые размеры на рис. 8-5. Текстолит представляет собой листы хлопчатобумажной ткани, пропитанные бакелитовым лаком и спрессованные под большим давлением с подогревом. Текстолит имеет светлорыжий цвет. Гетинакс производится так же, как текстолит, но не из хлопчатобумажной ткани, а из бумаги. Гетинакс имеет темно-коричневый цвет. Оба материала широко применяются при изготовлении любительских радиоприемников.

На рис. 8-5 даны чертежи деталей каркаса. Он состоит из шести деталей — двух фланцев  $b$ , двух широких стенок  $б$  и двух узких стенок  $a$ . Во фланцах сделаны пазы шириной 41 мм, в которые будут входить полсы сердечника, выполняемого по рис. 8-3

Сначала надо вырезать из бумаги внешние контуры всех шести деталей и, наложив эти выкройки на лист подготовленного материала, разметить, как их лучше расположить, чтобы было меньше остатков материала. После этого надо приступить к нанесению контуров деталей на листе текстолита или другого изоляционного материала. Контуры должны быть нанесены точно по размерам циркулем, в который вместо графита надо вставить вторую

иглу. Контуры деталей на листе изоляционного материала должны быть процарапаны иглой, так как карандашные линии не могут обеспечить требуемой точности изготовления. Чтобы при вычерчивании контура детали избежать перекосов, надо сначала провести осевую линию и перпендикулярные к ней горизонтальные линии в тех местах, где

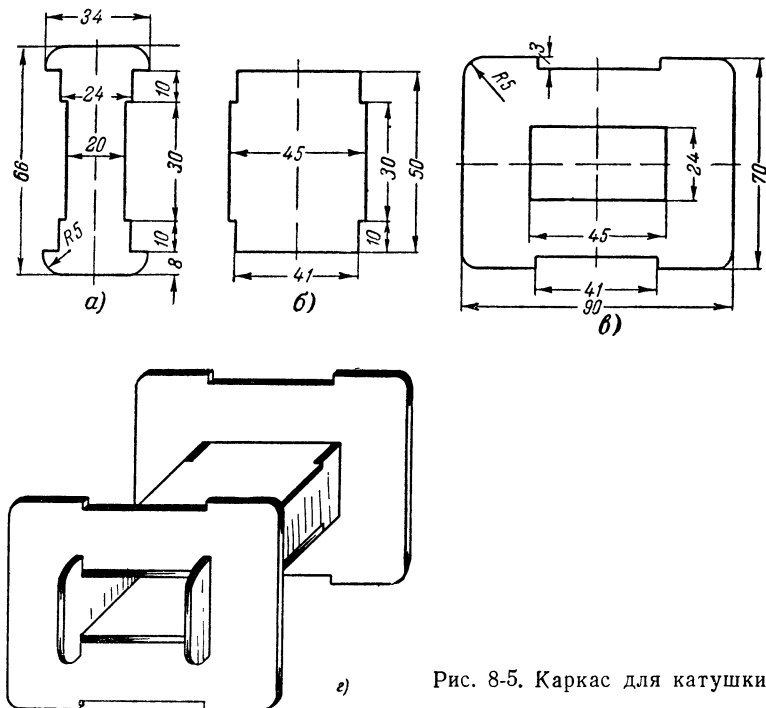


Рис. 8-5. Каркас для катушки.

деталь имеет переходы от одной ширины к другой. Затем от осевой линии надо откладывать вправо и влево половины размеров ширины деталей. Чтобы точно отложить размер, надо сначала иглы циркуля-измерителя приложить к линейке с точными миллиметровыми делениями и потом отложить этот размер на листе текстолита. Когда все точки контура нанесены на листе текстолита, их надо соединить линиями, которые проводятся острой иглой вдоль стальной линейки. Расстояния между контурами соседних деталей на листе текстолита должны быть около 3 мм.

После этого надо приступить к вырезке контуров де-

талей, что легче всего сделать лобзиком. При вырезке надо следить за тем, чтобы пилка лобзика была направлена перпендикулярно плоскости листа. Линия резки должна вплотную подходить к контуру детали, но не должна заходить за нее. Таким образом, на вырезанной детали должны быть видны царапины иглы, которыми очерчен контур детали.

После того как все детали выпилены, надо сложить две одинаковые детали, сжать их в тисках или в струбцинке и опилить контуры напильником. Тогда обе детали будут иметь одинаковые размеры. Те места, где одна деталь входит в другую, надо пригонять, складывая детали. Например, сначала надо отпилить напильником выступы длиной по 30 мм на детали *б*, а впадины для них на деталях *а* распилить так, чтобы выступы плотно входили во впадины. Таким образом, одна деталь служит контрольным шаблоном для другой. Размеры окон во фланцах должны быть распилены так, чтобы узкие стенки размерами 24 мм плотно входили в окно.

Сборка каркаса производится следующим образом. Сначала надо сложить два фланца и вставить в окно фланцев деталь *а*, вводя ее по диагонали окна; затем повернуть деталь *а* так, чтобы она прилегла к узкой стороне окна. Также вводится в окно фланца вторая деталь *а* и прижимается к противоположной стенке окна. Далее детали *б* надо приложить к деталям *а* так, чтобы выступы деталей *б* входили в пазы деталей *а*. Из деталей *а* и *б* образуется коробочка. Теперь осталось развести сложенные детали *в* так, чтобы они уперлись в выступы деталей *а*—и каркас готов. В собранном виде он показан на рис. 8-5,г.

Для намотки катушки необходимо сделать простенький станочек. Он состоит из деревянной дощечки *1*, к которой прибиты две стойки *2* (рис. 8-6). Каркас надевается на деревянный брусок *3*, в торцы которого вбиты два толстых гвоздя *4*. Они вкладываются в прорези в стойках, которые служат подшипниками, и сверху запираются накладками *5*. В процессе намотки пальцами правой руки надо поворачивать каркас, а в пальцах левой зажать провод, который должен идти с некоторым натяжением для получения плотной намотки. До начала намотки надо сложить провод в виде петли длиной около 200 мм. Конец петли длиной около 35 мм выводится через отверстие во фланце. Петля служит для того, чтобы усилить выводной конец

катушки и предохранить его от обрыва. В начале петли надо зачистить изоляцию провода и скрутить оба провода. Если один провод обломится при работе трансформатора, другой будет служить для проведения тока.

В процессе намотки надо считать витки, а чтобы не сбиться, на одной стороне фланца можно сделать пометку краской. После намотки каждой сотни витков на провод рекомендуется надеть бумажный ярлычок с номером сотни. Это пригодится, если вы сбились со счета. Намотку надо проводить правильными рядами, передвигаясь вдоль

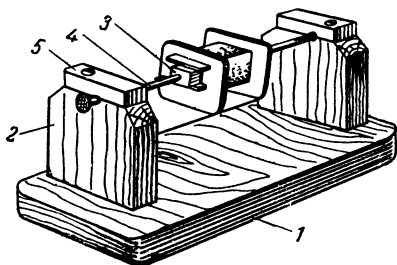


Рис. 8-6. Намоточный станок.

каркаса то в одну, то в другую сторону. После намотки трех-четырех слоев рекомендуется прокладывать между слоями папиросную бумагу. По окончании намотки первичной катушки надо снова сделать петлю, проколоть шилом отверстие во фланце и вывести конец катушки.

Между первичной и вторичной катушками надо положить несколько слоев провощенной бумаги, чтобы витки первичной и вторичной катушки ни в коем случае не могли соединиться. Такое замыкание сделает пользование трансформатором опасным, так как вторичная катушка окажется под напряжением осветительной сети.

Выводы от вторичной катушки можно делать одним проводом — он является достаточно прочным. Для выводов шилом прокалывают отверстия в противоположном фланце от выводов первичной катушки. При намотке вторичной катушки рекомендуется сделать вывод в виде петли после намотки  $\frac{2}{3}$  всех витков, и затем продолжать намотку, не обрывая провода. Тогда катушка будет иметь три вывода. Между первым и вторым будет напряжение 8 в, между вторым и третьим 4 в, а между первым и третьим 12 в. Такой трансформатор можно использовать и там, где нужны меньшие напряжения.

Для сердечника надо нарезать из тонкой жести полосы шириной по 40 мм и такой длины, чтобы они могли обогнуть каркас (рис. 8-3). Полосы можно нарезать из боковых сторон консервных банок. Края полос надо зачистить напильником от острых заусенцев, которые могут создавать замыкания между полосами. Для создания изоляции полосы надо покрыть тонким слоем асфальтового лака или олифой. Полосы надо сложить в пакет толщиной 20 мм и вставить его в отверстие каркаса. Концы полос должны быть сдвинуты на разную длину, чтобы стыки их приходились в разных местах (см. рис. 8-3). Половина полос загибается в одну сторону, а вторая половина в другую. Затем весь сердечник стягивают медной или мягкой железной проволокой, как показано на рис. 8-3.

Трансформатор надо прикрепить к любой изоляционной дощечке. Это можно сделать самыми различными способами: лентой, бечевкой, проволокой, металлическими полосками или винтами. При этом нельзя допускать вокруг сечения сердечника никаких замкнутых металлических витков, так как в них будут находиться индуктированные токи. Выводы вторичной обмотки подводят к винтам, а выводы первичной обмотки соединяются с осветительным шнуром с вилкой на конце. Соединения с осветительным шнуром надо пропаять и замотать изоляционной лентой.

## 8-6. Испытание

Чтобы убедиться в исправности каждого технического изделия, после изготовления его нужно испытать. Неисправности трансформатора могут заключаться в обрыве первичной катушки, в замыканиях между катушками или замыканиях между катушками и сердечником. Электрические схемы обычно проверяют при помощи контрольной лампы, в качестве которой может быть применена обычная настольная лампа. Одна ножка вилки от лампы вставляется в розетку осветительной сети, а от другой ножки и второго гнезда розетки выводятся два изолированных провода (рис. 8-7). Если теперь замкнуть между собой концы проводников, то лампа загорится. Это показывает, что лампа в порядке и можно приступить к испытанию трансформатора. В процессе испытаний нельзя касаться пальцами неизолированных концов проводов и ножек вилки, чтобы не подвергнуться поражению электрическим током при однополюсном касании к осветительной сети.

Сначала проверяем, нет ли в первичной катушке обрывов. Для этого надо прикоснуться проводом от розетки к ножкам вилки трансформатора, как показано на рис. 8-7 (схема б). Если в катушке нет обрывов, то лампа будет гореть, но не полным накалом из-за падения напряжения

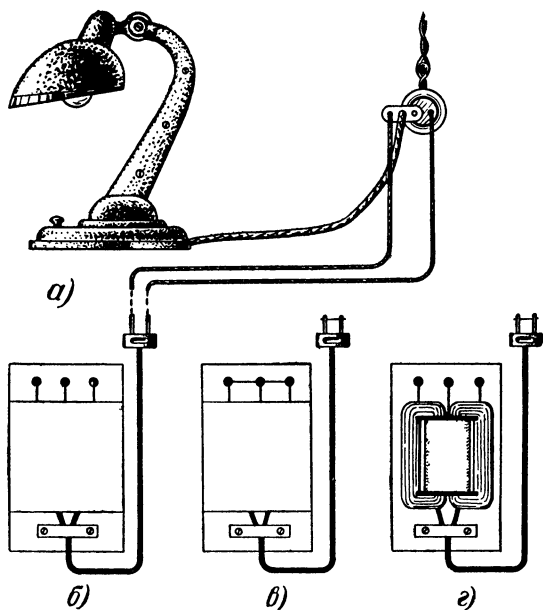


Рис. 8-7. Схема испытаний трансформатора.

в катушке. Если же лампа не загорается, значит, есть обрыв или в самой катушке или в соединениях ее выводов со шнуром.

Чтобы проверить, нет ли замыканий между первичной и вторичной катушками, надо соединить все зажимы вторичной катушки одним проводом и обе ножки вилки трансформатора — другим проводом. Одним проводом от розетки надо прикоснуться к зажимам вторичной катушки (рис. 8-7, схема в), а другим — к ножкам вилки трансформатора. Если трансформатор исправен, то лампа не должна загораться.

Для проверки отсутствия замыканий первичной катушки на сердечник надо одним проводом от розетки прикоснуться к ножкам вилки трансформатора, а другим к сер-

дечнику трансформатора (рис. 8-7, схема *г*). При отсутствии неисправности лампа не должна загораться.

Но в катушках могут быть замыкания витков, которые нельзя обнаружить контрольной лампой, так как замкнутые витки не создают разрывов в цепи. Для обнаружения замкнутых витков надо трансформатор со снятой коробкой включить в сеть. Если в катушках есть короткозамкнутые витки, то по ним потечет сильный ток, они нагреются и от трансформатора пойдет дым. Если через 30 *мин* после включения не будет чувствоваться запаха горелой изоляции, то можно считать, что замкнутых витков в обмотке нет.

Теперь осталось проверить правильность обозначений выводов вторичной катушки. Для этого надо между выводами 2—3 включить одну лампочку от карманного фонаря, между выводами 1—2 две лампочки, соединенные последовательно, а между зажимами 1—3 три лампочки, соединенные последовательно. Если обозначение выводов правильное, то все лампочки будут гореть с одинаковым накалом.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава первая. Техника безопасности . . . . .	6
1-1. Общие правила техники безопасности . . . . .	6
1-2. Правила безопасности при работе с электротехническими установками . . . . .	7
1-3. Правила пожарной безопасности . . . . .	11
Глава вторая. Электродвигатели постоянного тока . . . . .	12
2-1. Проводник в магнитном поле . . . . .	12
2-2. Назначение коллектора . . . . .	15
2-3. Устройство двигателей постоянного тока . . . . .	16
2-4. Как работает электродвигатель . . . . .	18
2-5. Характеристики двигателей . . . . .	21
2-6. Применение двигателей постоянного тока . . . . .	24
2-7. Потери энергии в двигателе . . . . .	26
Глава третья. Переменный ток и его свойства . . . . .	28
3-1. Получение переменного тока . . . . .	28
3-2. Действующие значения переменного тока и напряжения . . . . .	31
3-3. Самоиндукция . . . . .	32
3-4. Закон Ома для цепи переменного тока . . . . .	34
3-5. Мощность переменного тока . . . . .	35
3-6. Трехфазный ток . . . . .	36
3-7. Трехфазные асинхронные двигатели . . . . .	41
Глава четвертая. Однофазные двигатели переменного тока . . . . .	42
4-1. Коллекторный двигатель . . . . .	43
4-2. Однофазные асинхронные двигатели . . . . .	47
4-3. Двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе . . . . .	50
4-4. Двигатели с пусковыми обмотками . . . . .	52
4-5. Конденсаторный двигатель . . . . .	55
4-6. Двигатель с массивным ротором . . . . .	56
Глава пятая. Расчет электродвигателей . . . . .	56
5-1. Зачем нужны расчеты? . . . . .	56
5-2. О расчете электродвигателей . . . . .	58
5-3. Обмоточные провода . . . . .	62
5-4. Таблица намагничивания . . . . .	64
5-5. Номинальные данные двигателя . . . . .	66
5-6. Расчет двигателей постоянного тока . . . . .	68
5-7. Пример расчета двигателя постоянного тока . . . . .	81
5-8. Расчет коллекторного двигателя переменного тока . . . . .	85
5-9. Расчет однофазных асинхронных двигателей . . . . .	86



5-10. Пример расчета однофазного асинхронного двигателя . . .	89
5-11. Расчет конденсаторного двигателя . . . . .	93
<b>Глава шестая. Конструкции и изготовление электро-</b>	
<b>двигателей . . . . .</b>	<b>94</b>
6-1. Что такое технология? . . . . .	94
6-2. Виды производства . . . . .	96
6-3. Взаимозаменяемость деталей . . . . .	97
6-4. Вал . . . . .	100
6-5. Листы статора и ротора (якоря) . . . . .	101
6-6. Сердечник ротора (якоря) . . . . .	104
6-7. Обмотка якоря коллекторного двигателя . . . . .	106
6-8. Коллектор . . . . .	111
6-9. Щетки и щеткодержатели . . . . .	114
6-10. Ротор асинхронного двигателя . . . . .	117
6-11. Балансировка якорей и роторов . . . . .	118
6-12. Статор коллекторного двигателя . . . . .	120
6-13. Статор асинхронного двигателя с короткозамкнутым вит-	
ком на полюсе . . . . .	123
6-14. Статор асинхронного двигателя с равномерно распределенной	
обмоткой . . . . .	124
6-15. Подшипники . . . . .	127
6-16. Асинхронный двигатель заводского изготовления . . . . .	129
<b>Глава седьмая. Электротехнические модели . . . . .</b>	<b>130</b>
7-1. Вентилятор . . . . .	130
7-2. Стрелбоскоп . . . . .	132
7-3. Фрикционная передача . . . . .	134
7-4. Привод швейной машины . . . . .	135
7-5. Электропронграватель . . . . .	136
7-6. Электророботка . . . . .	137
7-7. Реверсор . . . . .	139
7-8. Подъемный кран . . . . .	139
7-9. Троллейбус . . . . .	141
<b>Глава восьмая. Трансформатор для питания двигате-</b>	
<b>лей . . . . .</b>	<b>142</b>
8-1. Как работает трансформатор . . . . .	142
8-2. Конструкция . . . . .	144
8-3. Расчет . . . . .	146
8-4. Пример расчета . . . . .	150
8-5. Изготовление . . . . .	152
8-6. Испытание . . . . .	156

**Цена 3 р. 75 к.**