

Е. Марек

**Обмотки электрических машин постоянного
и переменного тока**

**Москва
«Книга по Требованию»**

Е11 **Е. Марек**
Обмотки электрических машин постоянного и переменного тока / Е. Марек – М.: Книга по Требованию, 2024. – 98 с.

ISBN 978-5-458-24767-2

Труд, который предлагается вниманию читателя, отвечает назревшей потребности. Значение этого руководства станет очевидным, если дать себе отчет об условиях работы в современной промышленности. Раньше, молодой инженер, пройдя курс высшей школы, должен был долго обучаться в производстве, в котором он предполагал работать, пока он не ознакомится с так называемыми «секретами производства», секретов производства в настоящее время нет, что можно усмотреть хотя бы из того, что все крупные фирмы охотно предоставили в распоряжение автора настоящей книги все сведения, касающиеся производственных процессов. От начинающего инженера требуют, чтобы по окончании школы он обладал серьезными практическими сведениями, чтобы по возможности сокращен был срок его подготовки, и чтобы он немедленно был привлечен к той работе, которая от него требуется. В виду вышесказанного, мы полагаем, что это руководство может оказаться полезным большому кругу лиц, в первую очередь студентам электротехнических школ, предоставляя в их распоряжение большое количество сведений, которые обычно трудно получить; далее инженерам, техникам и монтажникам, практически имеющим дело с обмоткой, и перемоткой электрических машин, и, наконец, всем тем из специалистов, которые желают пополнить свои сведения в области динамо-машин и моторов. Надеюсь, что книга встретит прием, который она заслуживает, и мы полагаем, что успех этой книги будет вполне соответствовать пользе, которую она принесет

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Для правильной работы двухполюсная кольцевая машина должна удовлетворять нижеследующим условиям:

- а) Обмотка должна быть безусловно симметричная.
- б) » » составлять вполне замкнутую цепь.
- в) Вышеуказанная цепь должна во всякий момент состоять из двух частей, дающих одинаковые и противоположные по направлению электродвигательные силы, считая от щеток противоположных полюсов.
- г) Электродвигательная сила в проводниках каждой из частей кольца одинакова по направлению.

Этим же условиям должен удовлетворять и якорь барабанного типа.

Цепь обмотки. Определение. Цепью обмотки или просто цепью называют часть обмотки, которую надо пройти от одной щетки до прихода в другую щетку.

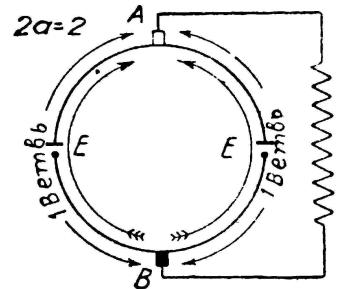
Другими словами, число цепей соответствует числу ответвлений якоря, токи которых складываются, чтобы дать общий ток, идущий во внешнюю цепь.

Число ветвей в якоре всегда четное (условие В). При двухполюсной машине — $2a = 2$.

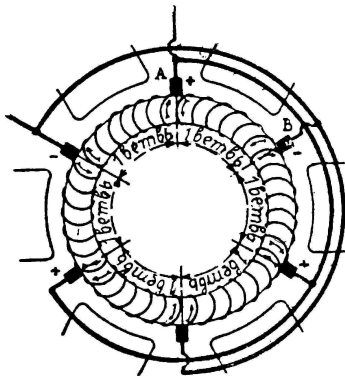
Многополюсный якорь. Обмотка многополюсной машины, как бы сложна ни была ее схема, должна удовлетворять вышеперечисленным условиям и, в частности, условию в), но в этом случае обе части якоря вместо одного направления имеют каждая по несколько направлений, число которых может быть четным или нечетным.

Чтобы избежать циркуляции тока между обмотками, «цепи обмоток» должны давать одинаковые по величине электродвигательные силы, т.-е. иметь одинаковое число активных витков.

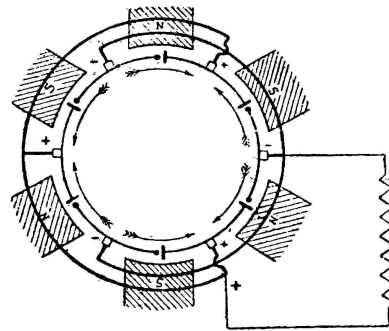
Секции. В предшествующих схемах кольцевой обмотки мы соединяли каждый виток обмотки якоря с коллекторной пластиной. Возникает вопрос, всегда ли нужно таким образом соединять коллектор и нельзя ли обойтись, соединяя с коллектором не каждый виток, а делать соединения с коллектором через каждые n витков?



Фиг. 3. Схема, эквивалентная обмотке двухполюсной машины.



Фиг. 4. Ветви обмотки 6-полюсного кольца Грамма.



Фиг. 5. Схема, эквивалентная 6-полюсной обмотке кольца Грамма.

Другими словами, не может ли число пластин коллектора K быть некоторой частью числа витков.

Чтобы уяснить себе этот вопрос, будем уменьшать число пластин коллектора и посмотрим, что это нам дает?

1. Постоянство разности потенциалов между щетками будет уменьшаться. Нижеприведенная таблица дает отклонения от средней разности потенциалов, принятой за 100, при различном числе пластин на полюс.

Число коллекторных пластин на пару полюсов.	Отклонения.
2	50,00
4	14,04
10	2,38
15	1,70
20	0,61
30	0,28
50	0,14
60	0,07
90	0,03

При 50 пластинах на пару полюсов, таким образом, напряжение уже постоянно с точностью до 0,1%.

2. Самоиндукция части обмотки, коротко замыкаемой щеткой, увеличивается. Это увеличение происходит от того, что вместо короткого замыкания одного витка коротко замыкаются несколько витков, соединенных последовательно. Увеличение самоиндукции ухудшает условия коммутации, и из этих соображений было бы желательно, чтобы только один виток был бы включен между двумя коллекторными пластинами.

3. Напряжение между двумя смежными коллекторными пластинами увеличивается. Можно принять, что максимум напряжения, которое может быть допущено между смежными пластинами, не должно превосходить 25 вольт.

Из соображений уменьшения напряжения между пластинами работа машины будет лучше, если в коллектору будет присоединяться каждый виток.

Но, с другой стороны, с уменьшением числа коллекторных пластин уменьшается и стоимость машины. Кроме того толщина каждой коллекторной пластины не должна быть меньше 3 мм, что при большом количестве пластин чрезмерно увеличивает размеры коллектора.

На практике, обычно, число пластин коллектора меньше числа витков на якоре.

Таким образом, $K = s$ или $K < s$.

В последнем случае и число пластин K должно составлять определенную часть числа витков $K = \frac{s}{n}$, где n число целое.

Мы, таким образом, встречаемся с понятием секции, имеющим весьма важное значение для изучения обмоток, и понятие — секция, должно быть ясно усвоено.

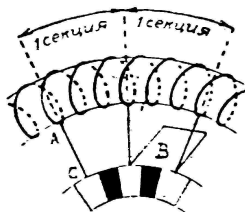
Секцией называется совокупность витков, через которые надо пройти, если идти по обмотке от одной коллекторной пластины к следующей.

Щетка B , когда она ляжет на коллекторные пластины, коротко замыкает одну секцию (фиг. 6).

Общее число секций обмотки обозначается буквой S , и согласно вышеприведенному определению $K = S$.

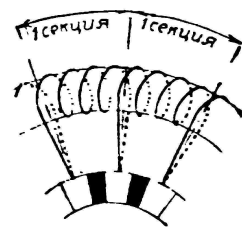
Секция может состоять из одного витка, тогда — $K = s$, или из нескольких витков и тогда — $K = \frac{s}{n}$.

Практическая форма секции при кольцевой обмотке. Приведенные



Фиг. 6. Соединение секций (теоретическое).

ранее различные схемы кольцевой обмотки представляли непрерывную обмотку, которая при помощи соединений типа AC , припаянных в точках A и C , соединялась с коллектором. На практике схема лучше осуществляется способом, указанным на фиг. 7, т.е. обмотка производится отдельными секциями. Непрерывность обмотки производится припайванием концов секций к коллектору. При ремонте достаточно заменить поперечную секцию.



Фиг. 7. Соединение секций (практическое).

Обмотка, таким образом, имеет столько соединений, сколько имеется секций.

Обмотка на практике приводится к изготовлению секций, что и определяет важное практическое значение секции.

ГЛАВА II.

Якорь барабанного типа.

Условия, которым должен удовлетворять якорь. Перечислим вновь условия, которые, как мы уже указали, должны быть выполнены во всех случаях, когда желательно иметь постоянную электродвигательную силу при применении замкнутой обмотки и коллектора:

- а) Обмотка должна быть симметрична.
- б) » » представлять замкнутую цепь.
- в) Эта цепь должна состояться из $2a$ ветвей, дающих равные и противоположные электродвигательные силы.

Если предположить, что вышеуказанные условия выполнены, вопрос обмоток может быть рассмотрен из двух точек зрения, а именно: со стороны электрической и механической.

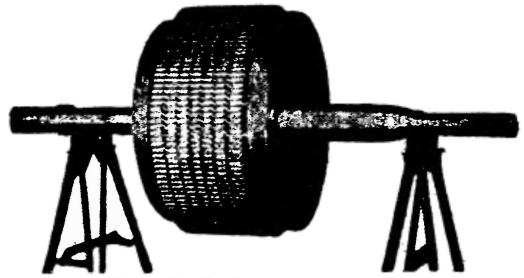
Со стороны электрической — обмотка должна соответствовать расчетным данным.

Со стороны механической:

- а) максимально должна быть использована применяемая медь,
- б) обмотка и соединения между обмотками должны уложиться на якоре, обмотка якоря должна производиться скоро, быть прочной и иметь красивый внешний вид.

Все вышеуказанные требования должны быть приняты во внимание при выполнении обмотки.

Зубчатая арматура. Чтобы не подвергать, с одной стороны, проводники электромагнитному действию, а также, чтобы уменьшить междужелезное пространство и сделать обмотку механически прочной, проводники обмотки впадут в пазы, разъединенные друг от друга зубцами, откуда и название зубчатая арматура (фиг. 8).



Фиг. 8. Зубчатая арматура.

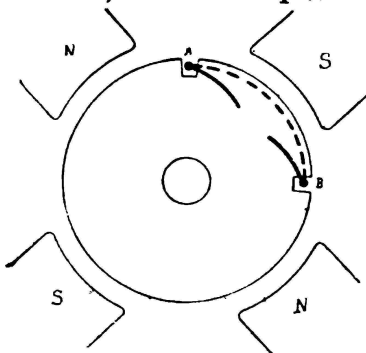
Из соображений симметрии механической и электрической (условие «а») в каждом из пазов находится равное число проводников.

Мы можем, таким образом, приняв за N — общее число проводников, R — число пазов, c — коэффициент (целое число), — написать уравнение $N = cR$.

ГЛАВА III.

Обмотка в целом должна быть симметрична.

Виток. Секция. Катушка. Электродвигательная сила, которую дает динамо-машина, есть электродвигательная сила индукции. Она образуется от перемещения витков зубчатого якоря, образованных каждый двумя проводниками и соединениями между ними, попеременно между полюсами северным и южным двух — или многополюсного индуктора.



Фиг. 9. Виток барабанной обмотки.

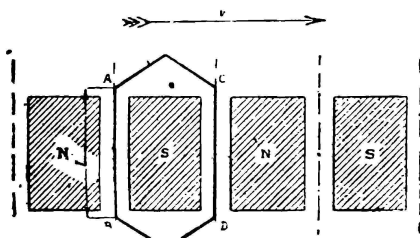
Абсолютное значение электродвигательной силы в момент t определяется по формуле $e = \frac{d\Phi}{dt}$, где Φ магнитный поток, пересекаемый витком в данный момент. Индуцируемая электродвигательная сила в каждом витке есть величина переменная.

Вместо того, чтобы рассматривать индукцию витка, можно представить себе, что проводники AB и CD витка пересекают линии сил, и что в каждом из них

индуцируется электродвигательная сила, значение которой в каждый момент (фиг. 10)

$$e = Hlv, \text{ где:}$$

H —напряжение магнитного поля, пересекаемого проводниками в данный момент, l —длина проводника, v —скорость перемещения проводника в данный момент¹⁾.



Фиг. 10

В некоторых случаях рассуждения проще, если рассматривать виток, в других—проводники; в этом руководстве, в дальнейшем рассматриваются, в зависимости от случая, проводник или виток.

Примечание; Проводник состоит или из одного провода, или из параллельно расположенного ряда проводников.

Наилучшее использование меди витка.

Для наилучшего использования меди нужно, чтобы электродвигательная сила, индуцируемая в одном проводе, ни в коем случае не ослаблялась электродвигательной силой в другом проводнике. Это условие будет соблюдено, если оба провода одного витка не будут приходиться против одноименных полюсов.

Назовем ширину витка (фиг. 11) y_1 шагом, тогда имеем

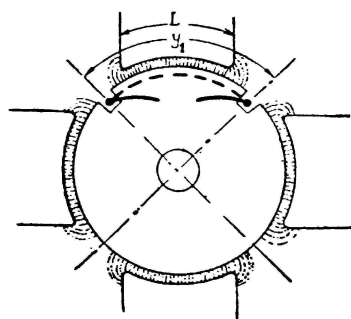
$$L \leq y_1 \leq L^1,$$

откуда получаем чрезвычайно важное правило.

Правило. Виток должен охватывать весь магнитный поток, исходящий от полюса, и не должен никогда захватывать магнитные потоки, исходящие от двух одноименных полюсов.

Между двумя пределами L, L^1 должна находиться величина шага витка и в этих пределах величина шага может изменяться. Однако, если сделать $y_1 = L$, то количество меди, потребное для витка, будет наименьшее.

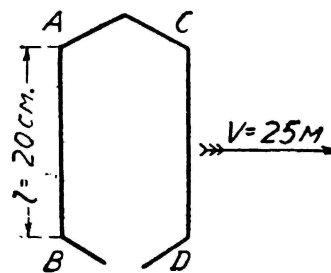
Это укорочение шага не дает заметных преимуществ с электрической точки зрения (см. специальные труды по коммутации). Принимая же во внимание магнитное рассеяние, действительная активная ширина полюса увеличивается, в виду чего



Фиг. 12.

рекомендуется давать y_1 величину близкую между-полюсному шагу или осевому расстоянию между двумя соседними полюсами (фиг. 12).

Максимальная электродвигательная сила витка. Индуцируемая в витке электродвигательная сила является величиной переменной. Если взять размеры якоря, соответствующие данным практики, и если принять



Фиг. 13.

величину индукции и скорость вращения якоря также соответственно данным практики, то максимальное значение индуцированной электродвигательной силы будет весьма мало.

Пусть, например, имеем виток, состоящий из двух проводников длиной l .

¹⁾ Само собою разумеется, что перемещение принято нормальное к проводнику.

Для каждого проводника $e' = Hlv$. Если примем данные по фиг. 13: H —максимум 5000 гаусс; l —максимум 20 см; v —максимум 25 м/сек, то мы будем иметь $e'_{max} = \frac{5000 \cdot 20 \cdot 2500}{10^8} = 2,5$ вольт.

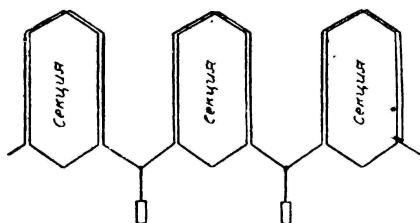
Электродвигательная сила витка составит $e_{max} = 2 e'_{max} = 5$ вольт.

Чтобы получить максимум 120 вольт, нужно соединить последовательно $\frac{120}{5}$, т.е. 24 витка или 48 проводников, в которых одновременно индуцируется максимальная электродвигательная сила.

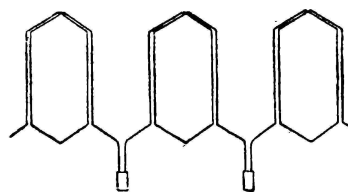
При двухполюсной машине 48 проводников составят $\frac{1}{2}$ всей обмотки и для полной обмотки якоря потребуется 96 проводников.

Секция. Не касаясь особых свойств барабанного якоря, отметим, что число коллекторных пластин, как известно, или равно числу витков, или равно числу витков, деленному на целое число.

Если $K = s$, конец каждого витка присоединяется к коллекторной пластине и секция включает только один виток, если же $K = \frac{s}{n}$, то, чтобы притти от одной коллекторной пластины к другой, нужно пройти n витков. Каждый n витков образуют секцию. В этом случае, как и в кольце Грамма, вместо того, чтобы делать спайки от обмотки к коллектору, как указано на фиг. 14, на практике выполнение



Фиг. 14. Соединения между секциями (теоретическое).



Фиг. 15. Соединения между секциями (практическое).

обмотки значительно облегчится, если обмотка будет разделенная и конец каждой секции будет подводиться к коллекторной пластине. Обмотка в этом случае приводится к укладке секции; непрерывность же обмотки достигается припайкой свободных концов отдельных секций к пластинам коллектора (фиг. 15).

Из вышесказанного можно сделать следующий вывод: секция представляет на практике элемент обмотки.

Остается выяснить, какую форму должна иметь секция, чтобы:

- 1) вся обмотка могла бы быть получена при помощи типовой секции,
- 2) чтобы секция могла легко и быстро выполняться.

Осуществлением этих двух условий конструктивная задача полностью разрешается.

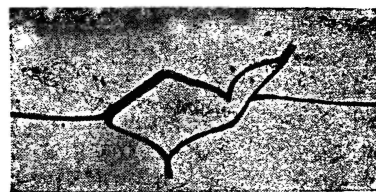
На практике пришли к двум типовым формам обмоточных секций, представленных на фиг. 16 и 17.

Секция, согласно фиг. 16, называется бочковидной или броневой.

Секция, согласно фиг. 17, по развертке — лобовой.



Фиг. 16. Броневая секция.

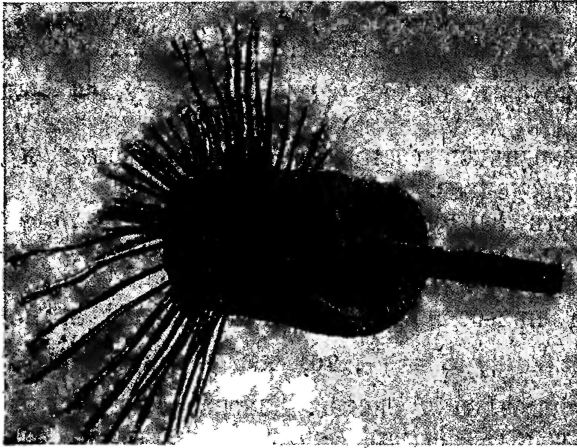


Фиг. 17. Лобовая секция или секция по развертке.

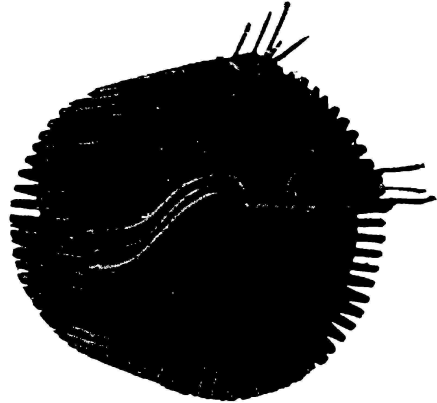
В первом типе наружные соединения всей обмотки производятся по двум концентрическим поверхностям по отношению к оси машины (фиг. 18), при втором

типе обмоток соединения расположены в двух плоскостях, перпендикулярных к оси (фиг. 19).

Рассматривая последние две фигуры, можно заметить, что оба вышеуказанных



Фиг. 18. Якорь с броневыми секциями.



Фиг. 19. Якорь с секциями по развертке.

типа предполагают, что одна сторона секции расположена в верхней, другая—в нижней части паза, занятого секцией.

Такое расположение обуславливает определенные соотношения, которые мы и выведем после того, как мы установим, что подразумевается под определением «якорного пучка».

Якорный пучок. Якорным пучком называется комплект проводов секции, расположенных в одном пазу (фиг. 20).

Можно применить и такое определение: якорный пучок состоит из проводов секции, занимающих одинаковое положение в магнитном поле.

Число же проводов a , следовательно, и число витков секции нас интересует только при изготовлении секции.

Введением термина «якорный пучок» мы в формулах обмоток, которые указывают, как должны соединяться отдельные якорные пучки или секции между собой для получения желательных электрических свойств, отбрасываем понятие «проводники».

Каждая секция состоит из двух якорных пучков, из которых один расположен в верхней части паза, другой в нижней половине паза, занятого секцией.

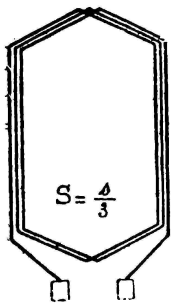
Чтобы заполнить все пазы одним типом секций, нужно, чтобы каждая половина паза содержала целое число якорных пучков, т.-е. число пучков в каждой секции должно быть четное—это условие можно выразить иначе, а именно: число секций S должно быть кратным числу пазов K .

Чтобы ограничиться одним типом секций, форма секций должна быть такова, чтобы якорный пучок, напр., 1, расположенный в левом пазу вверху, соединялся бы с пучком $1 + y_1$, расположенным внизу с левой стороны другого паза (фиг. 21).

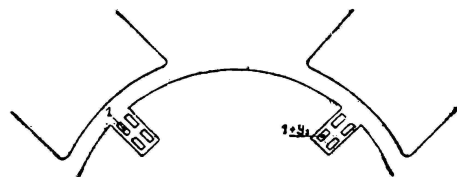
Если обозначим общее число пучков через F , можно написать $F = 2S$.

Пучки, расположенные в верхней части пазов, обозначают нечетными цифрами; пучки, расположенные в нижней части пазов, обозначаются четными цифрами.

Всякая секция имеет, таким образом, 2 пучка: один—четный, другой—нечетный. Если условиться измерять шаг y числом пучков, которые разделяют на яворе



Фиг. 20.



Фиг. 21.

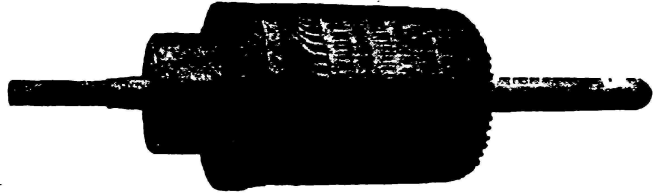
пучки, составляющие секцию, то шаг y представит разницу двух чисел, из которых одно четное, другое нечетное, и будет всегда числом нечетным.

Это условие, вместе с ранее приведенными, позволяет установить данные для изготовления секции, если подсчетом установлено число витков и размеры проводников.

Интересно заметить, что уже сейчас можно представить себе внешний вид, который будет иметь обмотанный якорь, если отвлечься от электрических свойств, которыми он должен обладать.

Электрические же свойства якоря зависят только от последовательного соединения свободных концов секций между собой, которое производится, чтобы образовать замкнутую обмотку.

Фиг. 22 относится к законченному якорю броневой обмотки.

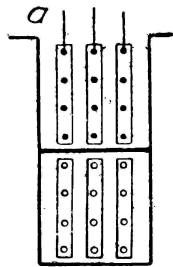


Фиг. 22. Якорь с броневой обмоткой.

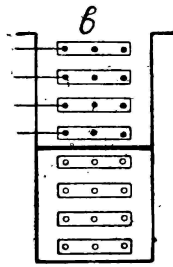
Положение пучков в пазу. Рассмотрим паз, в верхней половине которого находятся 12 проводников. Мы можем расположить пучки или на ребро, или горизонтально.

Первое расположение требует три секции в пазу, второе—четыре.

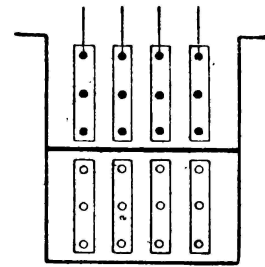
Расположение горизонтальное (фиг. 24) менее рационально, чем вертикальное, (фиг. 23), так как секции расположены, в этом случае, различно по отношению к осно-



Фиг. 23.



Фиг. 24.



Фиг. 25.

ванию пазу, в виду чего они имеют различные коэффициенты самоиндукции. Нужно стремиться к вертикальной группировке, которая является предпочтительной, так как она представляет также несколько лучшее использование материала.

Если нам желательно иметь 4 секции, можно изменить форму пазу, как указано на фиг. 25, не касаясь вопроса, какие соотношения между пазами и зубцами якоря более удачны.

ГЛАВА IV.

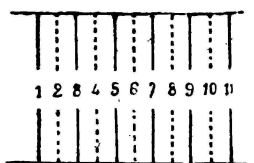
Обмотка должна представлять замкнутую цепь.

Последовательное соединение секций обмотки; условие, которое должно быть соблюдено, чтобы обмотка была замкнута, и чтобы использованы были все пучки.

Чертежи обмоток. Применяются два способа для изображения обмотки.

1) Система разверток (фиг. 26). По этой системе якорь предполагается разрезанным по образующей и развернутым на плоскости.

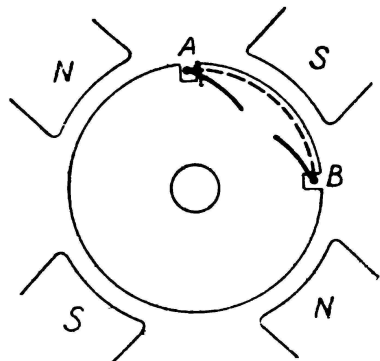
Якорные пучки, которые расположены в пазах, изображаются прямыми, параллельными оси машины и расположенными на равных расстояниях; сплошные линии пред-



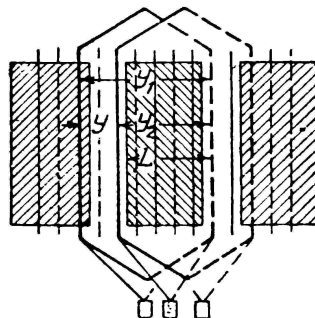
Фиг. 26. Система разверток.

ставляют пучки в верхней части пазов, пунктирные линии — пучки в нижней части пазов.

2) Система проекций. По этой системе ось машины принимается перпендикулярной к плоскости чертежа. Якорные пучки изображаются либо в виде точек,



Фиг. 27. Фронтальная проекция.



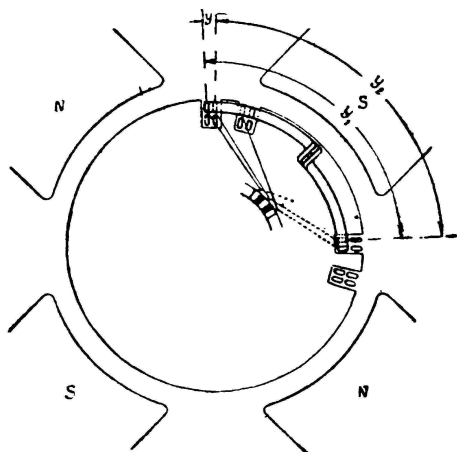
Фиг. 28. Петлевидная обмотка (в развертке).

равномерно распределенных по окружности, либо соответственно их действительному расположению в пазах.

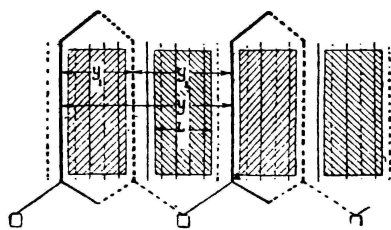
Петлевидная и волнообразная обмотки. Последовательное соединение секций для получения замкнутой цепи производится двояким способом.

Первый характеризуется тем, что секции обмотки имеют последовательное направление взад и вперед попеременно, образуя, таким образом, петли.

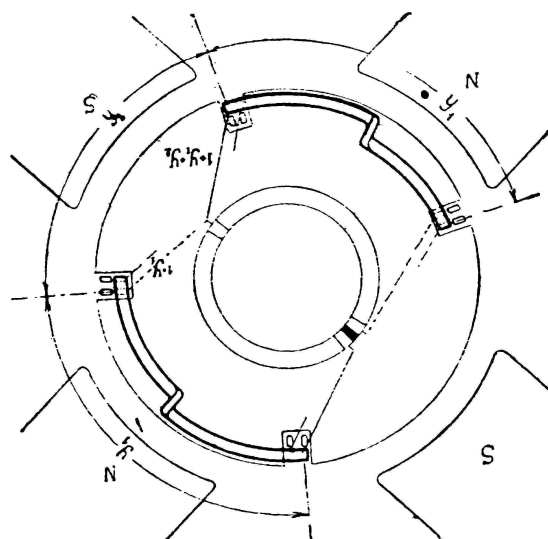
По этой системе соединяют всегда последовательно конец одной секции с началом другой (фиг. 28 и 29).



Фиг. 29. Петлевидная обмотка (в проекции).



Фиг. 30. Волнообразная обмотка (в развертке).



Фиг. 31. Волнообразная обмотка (в проекции).

Для того, чтобы при таком способе соединения напряжения складывались, необходимо, чтобы соответственные секции находились в один и тот же момент под действием одного и того же полюса или одноименных полюсов.

Второй метод характеризуется последовательным движением вперед, т.е. образованием волн, почему обмотка получила название волнообразной. (Фиг. 30 и 31).

Шаги составляющие и шаги результирующие. — Обмотка петлевидная.

Для числового выражения расстояния между пучками мы будем принимать за единицу расстояние между двумя соседними пучками, на чертежах по системе разверток.

От пучка 1 идем в пучок $(1 + y_1)$, затем от пучка $(1 + y_1)$ возвращаемся в пучок $(1 + y_1) - y_2$. Расстояния y_1 и y_2 называются составляющими шагами, расстояние y — результирующим шагом. Расстояние y характеризует перемещение по окружности явора при переходе от одной секции к следующей.

Для последовательного соединения двух соседних секций расстояние это принимают равным ± 2 в зависимости от того, как идет обмотка — вправо или влево.

Чтобы не вводить противодействующей электродвигательной силы, нужно, чтобы не только $y_1 > L$ — условие, необходимость выполнения которого было уже ранее указано, но чтобы также $y_2 > L$ (фиг. 30).

Волнообразная обмотка. Назовем, как выше, составляющие шаги через y_1 и y_2 и результирующий шаг через y . Мы можем написать при волнообразной обмотке следующее уравнение:

$$y = y_1 + y_2.$$

Должно быть также соблюдено условие:

$$y_1 \text{ и } y_2 > L.$$

Мы можем теперь дать себе отчет о виде, который имеет как петлевидная, так и волнообразная обмотки. Этот вид поучителен в том отношении, что здесь исчезает элементарный проводник, который интересен лишь с точки зрения витка, между тем как нас интересует только якорный пучок и секция.

Заметим также, что элемент обмотки — секция, будет иметь совершенно одинаковый вид при петлевидной или волнообразной обмотке и разница между ними будет только в отношении соединения с коллектором ¹⁾.

Условия, при которых цепь обмотки замкнута. Всякая обмотка, петлевидная ли или волнистая, должна замкнуться, используя один раз, но и не более одного раза, все якорные пучки.

Раньше, чем рассматривать условия, которым должны удовлетворять шаги y , y_1 и y_2 , следует отметить, что петлевидная обмотка представляет только частный случай волнообразной обмотки.

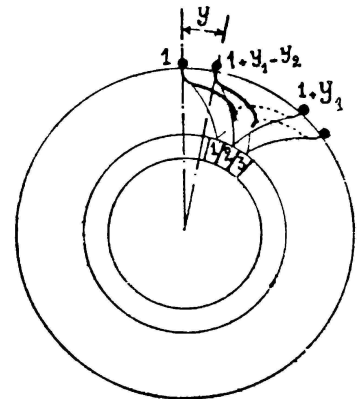
На самом деле, рассмотрим петлевидную обмотку (фиг. 32).

Пучок 1 соединяется с пучком $1 + y_1$, пучок $1 + y_1$ с пучком $(1 + y_1) - y_2$. Итти же обратно на y_2 пучков — равнозначуще: итти вперед на $F - y_2$ пучков.

Таким образом, петлевидная обмотка с шагами y_1 и y_2 равнозначуща волнообразной обмотке с шагами y_1 и $F - y_1$.

Выводы, сделанные для волнообразных обмоток, могут применяться, если принять новое значение шага y_2 , к обмотке петлевидной.

Замыкание цепи волнообразной обмотки. Если исходить от пучка 1 (фиг. 32) и если обмотка замкнута, мы должны притти к тому же пучку после



Фиг. 32.

¹⁾ Мы считаем полезным обратить особое внимание на то, что петлевидная и волнистые обмотки должны относиться к якорным пучкам, а не к элементарным проводникам, потому что, пока читатель еще не вполне освоился с вопросом, он стремится осуществить ту и другую систему на проводниках. При шинной обмотке, когда каждая секция состоит из 1 витка — это возможно, но если обмотка состоит из проводников — этот способ будет непрактичен.

того, как a раз пройдем якорную обмотку. С другой стороны, мы в это же самое время должны пройти столько раз y пучков, сколько имеется секций, т.-е. $\frac{F}{2}$ раз y пучков.

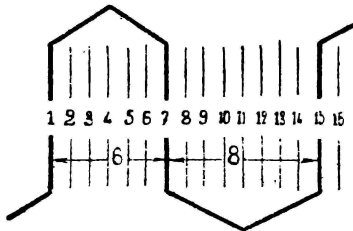
Это условие можно написать в виде уравнения:

$$\frac{F}{2} y = aF,$$

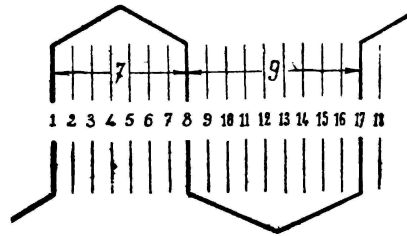
откуда $y = 2a$, т.-е. y должно быть число четное.

Последовательное использование четных и нечетных пучков. Результирующий шаг y — сумма составляющих шагов y_1 и y_2 — должен быть числом четным, в виду чего величины y_1 и y_2 должны быть оба четными или оба нечетными.

Если оба шага были бы четными, считая от первого пучка, то использованы были бы только нечетные пучки (фиг. 33).



Фиг. 33.



Фиг. 34.

Если же шаги y_1 и y_2 нечетные, то пройдем попеременно нечетные и четные пучки (фиг. 34).

Таким образом, y_1 и y_2 должны быть нечетными (1).

Использование всех пучков. Вышеприведенные условия недостаточны, чтобы утверждать, что использованы все пучки, потому что обмотка может быть заменена через какую-нибудь часть пучков.

Требуется добавочное условие, чтобы $\frac{y}{2}$ и $\frac{F}{2}$ были числа первые между собой.

В самом деле, если это условие не осуществлено, то можно написать уравнение:

$$\frac{y}{2} = qd \quad . \quad . \quad (1)$$

$$\frac{F}{2} = qd', \quad . \quad . \quad (2)$$

где q общий делитель.

Если мы пойдем от пучка 1, то, пройдя $2d'$ пучков, мы пройдем d' секций или $d'y$ пучков (3)

Но так как из уравнения (1) $y = 2qd$, то, заменив y этой величиной в уравнении (3), получим:

$$d'y = 2qd'd \quad . \quad . \quad (4)$$

Из уравнения (2) мы имеем $F = 2qd'$. Заменяя $2qd'$ через F в уравнении (4), получаем $d'y = dF$.

Таким образом, когда мы проходим $d'y$ пучков или $2d'$ пазов — мы пройдем вокруг арматуры d раз и придем в пучек 1.

Чтобы в этом моменту были пройдены все пучки и один только раз, надо, чтобы $2d' = F$.

Из уравнения (2) получим, что $q = 1$, т.-е., что числа $\frac{y}{2}$ и $\frac{F}{2}$ — числа первые между собой.