

Острые и острые края вносят уплотнение линии поля и поэтому должны избегаться в аппаратуре высокого напряжения. При включении друг за другом материалов с различным значением ϵ , напряжения материалов изменяются в сторону, благоприятную для материалов с меньшим значением ϵ .

В) Изолирующие материалы.

Для применения изолирующих материалов в технике высоких напряжений необходимо знание их свойств в отношении сопротивления пробою и неизменяемости от действия масла, воды и тепла, механической крепости и теплопроводности.

Испытание изолирующих материалов согласно норм VDE¹⁾ сводится к следующим определениям:

A. Механическое и тепловое испытание.

1. Сопротивление изгибу.
2. Сопротивление изгибу при ударе.
3. Определение твердости по вдавливанию шарика.
4. Неизменяемость от действия тепла.
5. Нестораемость.

B. Электрическое испытание.

1. Поверхностное сопротивление.
2. Внутреннее сопротивление.
3. Способность противостоять образовавшейся вольтовой дуге. Сводку смотри таблицу 8 на стр. 1206.]

Пробивные напряжения получаются, как средние значения эффективных напряжений. При испытании имеет значение амплитуда кривой напряжения. Сопротивление материала пробиванию обычно уменьшается с увеличением толщины и с повышением температуры.

Сопротивление пробиванию при испытании зависит, однако, не только от толщины слоя изолирующих материалов, но также и от формы электродов, между которыми происходит разряд. Малый радиус закругления, острия, острые края должны быть избеганы. При этом мерилом является максимальное значение силы возникающего электрического поля, которое, однако, только в редких случаях поддается достаточно точному расчету (см. выше).

Применение различных изолирующих материалов. Твердые материалы. Фарфор для линейных и проходных изоляторов. Напряжение на растяжение до 320 kg/cm², напряжение на сжатие до 4300 kg/cm². Мрамор, как основание для клемм, резе шифер; последний употребляется только для низких напряжений. Слюда (мика). Там где последняя, вследствие высокой стоимости и необходимости придать определенную форму, не может быть применена, употребляются препараты слюды, как миканит, мегомит, миканитовая бумага и полотно и так далее, напр. для изолирования обмоток (пазы). Дерево после тщательной просушки в пустоте и пропитывания лаками употребляется для клиньев пазов, укрепления обмоток в трансформаторах и так далее. Фибра в механическом отношении хороша, но очень гигроскопична.

Волокнистые материалы. Бумага во всех формах, пресспан, полотно с пропитыванием, или без последнего, в ржа для обмоток (пропитанная и не пропитанная) служат, однако, главным образом как основа для пропитывающих веществ. Пресспан при чистом

напряжении употребляется непропитанным; для высокого напряжения твердые композиции из бумаги; они содержат в себе высокую механическую и электрическую крепость, вместе с неизменяемостью от действия тепла и масла; пертинакс (фабр. Meigowsky-Мееровский), турбонит (фабр. Jaroslaw-Ярослав и др.).

Компаундные массы для обмоток высокого напряжения и венодиж их обмоток возбуждения. Пропитывание компаундной массой происходит при высоком давлении после просушки в безвоздушном пространстве. Иногда также без давления асфальтированные обмотки. Повышает одновременно теплопроводность обмоток.

Жидкие вещества. Лаки всех сортов, бесцветные и черные, высушиваемые часто в вакууме или при температуре выше 100°. Употребляются для пропитывания обмоток для повышения сопротивления пробиванию и как предохранительное средство против сырости.

Масло в трансформаторах и выключателях должно обладать определенным минимальным пробивным напряжением: для находящегося в работе трансформатора 60 kV/cm¹⁾.

Из минеральных масел для трансформаторов и масляных выключателей должны применяться только очищенные сорта (таблица 7):

Таблица 7. Минеральные масла для трансформаторов¹⁾.

Удельный вес при 20°: { минимум 0,85
максимум 0,95

Вязкость при 20°: максимум 8 (Энгер).

Точка воспламенения по Маркусону в открытом тигле: минимум 145°.

Точка затвердевания { Масло для выключателей:
минимум — 15°
Трансформаторное масло: минимум — 5°

[Свежее масло должно при 20° быть прозрачным и свободным от механических примесей и минеральных кислот. Содержание органических кислот не должно превышать 0,2% (подсчитанное как кислотное число). Содержание золы — максимум 0,01%, смолистость свежего, не кипевшего масла — максимум 0,2%.

Пробивное напряжение масла возрастает вместе с давлением.

Газообразные вещества, в особенности воздух. Пробивное напряжение воздуха зависит от расстояния между электродами и стрелки ся при 20° и 760 мм ртутного столба в постоянном поле к конечному значению 21 kV/cm. Оно прямо пропорционально давлению и обратно пропорционально абсолютной температуре, так что при 10 атмосферах достигает 210 kV/cm.

Об измерении напряжения помощью разряда между шарообразными электродами см. стр. 1348].

¹⁾ Нормы, принятые в СССР, см. „Электротехнические правила и нормы“ изд. Главэлектро ВСНХ СССР.

¹⁾ Vorschriften für die Prüfung elektrischer Isolierstoffe des VDE. ETZ. 623 B. 447.

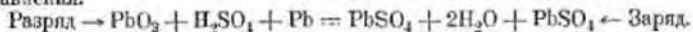
Большое применение получили сухие элементы, в особенности для карманных батарей и для сигнализации. Напряжение на клеммах разомкнутого элемента (ЭДС) 1,4—1,5 В; внутреннее сопротивление: от 0,1 до 0,5 Ω , смотря по их величине, для карманных батарей из трех элементов — от 2—3 Ω .

В. Вторичные элементы (аккумуляторы).

а) Свинцовые аккумуляторы

Из аккумуляторов с другими металлами в настоящее время имеют применение только щелочные аккумуляторы Эдиссона (стр. 1212).

Способ действия и изготовление. Действие основано на химическом разложении находящегося в разведенной серной кислоте свинцовых соединений, укрупненных большей частью в бороздках свинцовых пластин. При заряде на положительной пластинке образуется окисел свинца, на отрицательной — губчатый свинец; при разряде оба вещества переходят в сернистый свинец; процесс происходит согласно следующего уравнения:



Наиболее старый способ приготовления свинцовых аккумуляторов (Планте) состоит в многократном заряде и разряде (формовании) свинцовых пластин в разведенной серной кислоте. Фор укоротил продолжительность формования, применяя пасту из окиси свинца с разведенной серной кислотой, помещаемую в ячейках свинцовых пластин. Тюдор соединил оба способа, формуя предварительно пластину, снабженную горизонтальными бороздками по способу Планте и заполняя затем промежутки вышеуказанной пастой. Последняя в работе постепенно выпадает и замещается действующим слоем достаточной толщины, образующимся на поверхности свинцовой пластины путем формования в процессе работы.

В настоящее время в качестве положительных пластин употребляются главным образом пластины с большой поверхностью, а именно пластины, отлитые из чистого свинца с перпендикулярно друг другу глубокими бороздками, увеличивающими поверхность в 8—9 раз. Действующий слой образуется формованием с применением химических соединений, ускоряющих процесс электрохимического взаимодействия свинца с серной кислотой. Эти пластины с большой поверхностью значительно менее чувствительны при интенсивной работе, чем пластины с намазанной пастой, которые для более легкой работы имеют известные преимущества. В качестве отрицательных пластин употребляются иногда решетки с мелкими клетками с замазанной массой (свинцовый глет с примесью некоторых пидиферитных веществ, благодаря которым поддерживается пористость массы), или решетки с крупными клетками, куда вкладываются формованные из массы кубики, прикрываемые затем тонким листом свинца с пробитыми в нем отверстиями (лициная пластина). Положительные и отрицательные пластины, чередуясь, устанавливаются с промежутками от 5 до 10 мм (на краях помещаются отрицательные пластины). Для неподвижных аккумуляторов применяются стеклянные сосуды. Когда же размер последних оказывается

слишком велик, могут быть применены деревянные ящики, обитые свинцом. Однородные пластины припаиваются свинцовым припоем к свинцовым лентам, которые служат также для соединения аккумуляторов между собой. Пластины снабжены приливами соответствующей формы и подвешиваются на краях стеклянных сосудов. При деревянных сосудах пластины подвешиваются на специальных стеклянных опорных пластинках и разделяются или стеклянными трубками, или часто применяемыми в настоящее время пластинками из эбонита, или тонкими деревянными пластинками. Под пластинками должно быть достаточно места, где могли бы собираться выделяющиеся при работе осадки свинцовых солей. Транспортируемые аккумуляторы для локомотивов, лодок, освещения железнодорожных вагонов и т. г. выполняются с пластинками того же типа, как для неподвижных аккумуляторов. Для автомобилей, напротив, употребляются возможно легкие, установленные с минимальными промежутками, пластины в легких эбонитовых сосудах, с целью уменьшить вес и занимаемое пространство, конечно, за счет долговечности аккумулятора. Переносные аккумуляторы, употребляемые для освещения, для зажигания в автомобилях, для сигнализации, для целей телеграфии и измерительной техники, выполняются с сосудами из стекла, целлулоида и эбонита.

Кислота должна обладать большой чистотой, не должна содержать, кроме свинца, никаких металлов из группы осаждаемых сероводородом и только небольшие количества металлов из группы осаждаемых сернистым аммонием, а также хлорных и азотных соединений, и должна быть совершенно чиста от органических примесей. Кислота должна иметь удельный вес около 1,18, который при первом заряде поднимается до 1,2 и падает в процессе разряда от 0,12 до 0,05 (см. выше формулу химического процесса). Это изменение удельного веса представляет после некоторого наблюдения важное, почти единственно применяемое указание для определения степени заряда аккумулятора, в особенности при неравномерном и слабом разряде, при котором удельный вес изменяется почти пропорционально использованному ампер-часам.

В процессе работы плотность изменяется благодаря испарению воды и разбрызгиванию при выделении газов (кипение), поэтому время от времени следует добавлять химически чистую дистиллированную воду, или раствор кислоты, так, чтобы пластины всегда были вполне погружены в жидкость. Для уменьшения потерь жидкостей аккумуляторы прикрываются стеклянными пластинками.]

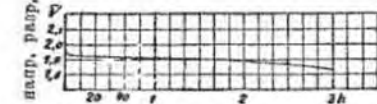
Внутреннее сопротивление в неподвижных заряженных аккумуляторах (по данным Akkumulatore-Fabrik A - G, Paderb. W. - AFA), в зависимости от размера пластин на ампер-час трехчасовой емкости, достигает 0,1 до 0,2 Ω ; сопротивление обратно пропорционально емкости. При разряде оно возрастает приблизительно в 1,5 раза.

Напряжение зависит от плотности кислоты и напряженности работы аккумулятора, почти не зависит от температуры и в состоянии покоя достигает 2,05 вольта при плотности кислоты 1,20 (напряжение покоя). При трехчасовом разряде оно изменяется согласно фиг. 164б; при заряде максимально допустимым током согласно фиг. 164г. Чем сильнее ток, тем больше напряжение отличается от напряжения покоя. Таким образом

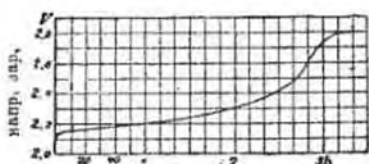
величина напряжения не является показательной для состояния заряда (об определении состояния заряда см. выше отдел кислоты, а также данные в отделе емкости).

Сила тока при заряде и разряде зависит от величины, конструкции и способа пользования аккумуляторами.

Допустимый зарядный ток равняется току при трехчасовом разряде. В аккумуляторах для быстрого разряда (1—2 часа) зарядный ток на 25% выше. Пример см. ниже.



Фиг. 16.16.



Фиг. 16.17.

При конце заряда зарядный ток полезно уменьшать (это представляет выгоду также для заряжающих машин).

Как правило, применяется заряд при постоянной силе тока; реже при постоянном напряжении и постепенно уменьшающейся силе тока (например, заряд аккумуляторных батарей для автомобилей при постоянном напряжении).

Емкость аккумуляторов определяется числом ампер-часов, используемых до определенного (в среднем 10%) падения напряжения; емкость оказывается тем больше, чем медленнее происходит разряд. См. нижеследующую таблицу для аккумуляторов АГА, в которой емкости отнесены к трехчасовому разряду, принятому за 1'

Время разряда	1	2	3	5	7 1/2	10 час.
Емкость	0,69	0,53	1	1,11	1,23	1,33
Конечное напряжение . . а)	1,75	1,75	1,83	1,83	1,83	1,83 V
(гарантиров. величина) . б)	1,70	1,75	1,80	1,83	1,83	— V
в)	1,67	1,72	1,78	1,80	1,83	— V

а) для батарей емкостью до 4000 Аh, б) до 7500 Аh, в) до 15000 Аh. Коэффициент полезного действия. Хорошие аккумуляторы возвращают около 90—95% количества электричества (Аh), затраченного на заряд. Затраченная работа при аккумуляторах емкостью до 4000 Аh (по данным АГА) возвращается в пределах 75% при 3—10-часовом разряде и 70% при часовом разряде; при больших аккумуляторах несколько меньше. При продолжительных перерывах отдача несколько уменьшается вследствие саморазряда.

Вес (G в кг). Нижеследующая таблица дает вес одного готового к работе элемента неподвижной батареи при различной величине их для трехчасового разряда, а также площадь, приходящуюся на 1 элемент (F в m^2), включая проход для обслуживания при расположении аккумуляторов на стеллажах. При данной емкости G и F для другого времени разряда могут быть перечислены согласно данным, приведенным выше в таблице (см. также пример):

	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	15000 Аh
$G = 23$	37	60	145	295	500	1350	2600	3800	kg/элемент
$F = 0,12$	0,2	0,2	0,36	0,46	0,83	1,25	1,9	2,4	$m^2/элемент$

Тяжелые подвижные батареи для лодок, локомотивов и т. д. дают около 8 Wh/kg, легкие для автомобилей дают 25 Wh/kg при 3-часовом разряде.

Пример: вес батарей в 60 элементов 110-вольтовой сети при емкости в 500 Аh, при трехчасовом разряде определяется в $60 \times 14 = 8700$ kg. Требуемая площадь $60 \times 0,36 = 21,6$ m^2 , рабочая мощность $110 \times 500 = 55000$ Wh, или $55000 : 8700 =$ около 6,3 Wh/kg.

При часовом разряде емкость аккумуляторов была бы $500 \times 0,69 = 345$ Аh (см. емкость), для 110-вольт необходимо иметь $110 : 1,75 = 63$ элемента, так что вес всей батареи будет $63 \times 145 = 9135$ kg, при $110 \times 345 = 37950$ Wh или $37950 : 9135 = 4,16$ Wh/kg.

Если батарея при часовом разряде должна иметь емкость 500 Аh, то вес ее, согласно таблице, должен быть приблизительно равен весу батареи на $500 : 0,69 \approx 725$ Аh или около $212,5 \times 63 = 13387,5$ kg, требуемая площадь около $0,405 \times 63 = 25,5$ m^2 . Допустимый нормальный ток (см. сила тока) $(500 : 0,69) : 3 = 725 : 3 = 242$ А, макс. $1,25 \times 242 = 303$ А.

Установка и включение. Аккумуляторы должны устанавливаться в сухом, вентилируемом, свободном от пыли, прохладном и защищенном от непосредственного действия солнечных лучей помещении, в котором следует избегать прокладки труб, железных консолей и т. п.

Вредные пары близлежащих установок, например, моторов, работающих топливом, содержащим спирт, холодильных машин, винокурных заводов, фабрик уксуса, а также пары из стойл для лошадей и навозных ям, не должны проникать в помещение.

[Сосуды должны быть тщательно изолированы от деревянных стеллажей, на которых они стоят, при помощи фарфоровых ножек; стеллажи должны быть сплошь пропитаны маслом или горячей смолой и должны быть изолированы от пола стеклянными или фарфоровыми изоляторами. При напряжении свыше 250 V по отношению к земле служебные проходы должны быть покрыты изолированными мостками. При напряжении свыше 750 V стеллажи и мостки должны быть укреплены на изоляторах высокого напряжения, стены должны быть покрыты изолирующими материалами, аккумуляторы должны быть установлены так, чтобы при соединении к точкам с разностью напряжений свыше 250 V было бы невозможно. Пол должен противостоять действию кислоты и должен быть либо покрыт асфальтом с неподвергающимися действию кислоты глиняными пластинками в местах опоры стеллажей, или из просмоленного дерева, или лучше из уложенных на цемент неподвергающихся действию кислоты металлических плит, или более дешевого клинкера, при чем шириной 8—10 см шириной залывается смесью из трех частей тринадцатого асфальта и двух частей каменноугольной смолы. Пол должен быть герметизированным и представлять верную и не подвергавшуюся изгибу опору для стеллажей батарей (значительный вес). Следует заботиться о хорошей вентиляции помещения, в случае необходимости помощью электрического вентилятора, с поступлением воздуха снизу с выходом наверху наискось напротив. Стены, потолок, железные части и т. п. рекомендуется окрашивать светлым лаком медные провода достаточно покрывать слоем сажи. Для наблюдения за аккумуляторами, испытания их на короткое замыкание и соединения с землей (помощью вольтметра или

лампы накаивания и гальванометра) аккумуляторы должны быть легко доступны, при чем при ширине сосуда свыше 0,75 м доступ должен быть с обеих сторон. После наполнения кислотой немедленно следует дать первый заряд продолжительностью, по крайней мере, 33 часов по специальным предписаниям поставляющей фирмы].

Уход и ремонт неподвижных батарей. Зарядка может считаться оконченной, когда на обеих пластинках наступает выделение газов, которое должно быть равномерным и начинаться во всех сосудах одновременно: запаивание в каком-либо из сосудов может быть обусловлено коротким замыканием или неправильным положением элементного коммутатора. Время от времени заряд следует производить с перерывами по инструкции фирмы. Уровень кислоты должен всегда поддерживаться выше верхнего края пластинок путем доливания дистиллированной водой, или, реже, химически чистой серной кислотой удельного веса 1,18. Кислоту следует прибавлять только в тех случаях, когда, несмотря на заряд с паузой, не может быть достигнут требуемый удельный вес. Слишком продолжительный заряд ведет к истощению положительной пластины, недостаточный заряд вызывает преждевременное искривление и набухание ее и выпадение массы из отрицательной пластины. В буферных батареях отдача энергии в батарею не должна вести к образованию газов.

Заряд должен быть прекращен после использования Ah соответствующих гарантированной для батареи емкости, что при полном разрядном токе определяется по падению напряжения ниже установленной величины, а при слабом разряде может быть определено только по плотности кислоты (см. стр. 1200).

Необходим регулярный осмотр каждого отдельного сосуда, очистка стеллажей, изоляторов и сосудов сварки, а внутри — очистка от осадков, образующихся на дне вследствие естественного плыва пластины. Осадки должны удаляться ранее, чем они достигнут нижнего края пластины, что производится большей частью помощью специальных насосов. Слишком частый сильный заряд, недостаточный заряд, несвоевременное устранение коротких замыканий между пластинками или недостаточно чистая жидкость для пополнения убыли кислоты, ведут к повреждению аккумуляторов.

Положительные пластины имеют склонность к искривлению и к выпадению действующей массы, которая вследствие дополнительного формирования, возобновляется до тех пор, пока не будет потеряна механическая крепость. Уход за батареями на срок до 10 лет часто производится поставляющими фирмами за особое вознаграждение.

Применение и схема соединений (подробно см. главу VII), схема соединений источников тока (стр. 1369).

б) Щелочные аккумуляторы.

Эдиссоновские аккумуляторы (в Германии выполняются фирмой Deutsche Edison-Akkumulatoren Company, Berlin). Благодаря незначительному весу и объему, нечувствительности к грубому механическому и электрическому обращению и к сильным колебаниям тока, применяются для аккумуляторных тележек, грузовиков, локомотивов, додок, телеграфии и телефонии. Сосуды готовятся закрытыми из никелированных стальных листов.

Действующими составными частями являются железо и никель в 21%-ном растворе едкого кали, удельный вес 1,2. Процесс протекает согласно уравнения $2Ni(OH)_2 + KOH + Fe = 2Ni(OH)_3 + KOH + Fe(OH)_2$. Напряжение при заряде поднимается с 1,0 до 1,8 V, при разряде напряжение падает с 1,4 до 1 V, составили в среднем 1,2 V при нормальной работе аккумуляторов. Время заряда составляет, смотря по типу, от 4 до 7 часов. Время разряда от 4 до 5 часов при семичасовом заряде и пятнадцаточасовом разряде зарядный ток равен соответствующему разрядному. Для ускорения времени заряда аккумуляторов, или для дополнительного их заряда, допустимо кратковременное повышение разрядного тока в 4—6 раз, смотря по величине соответствующего типа. Точно так же оказывается безвредным кратковременное повышение разрядного тока в три-четыре раза и разряд аккумуляторов до 0.

Коэффициент полезного действия при нормальном разряде в отношении к числу Ah составляет около 71%, а в отношении к Wh — около 51% для аккумуляторов, данные о которых имеются в проспектах указанной фирмы. Для наиболее крупных типов, по данным фирмы, эти значения поднимаются до 86 и соответственно 60%. Мощность по отношению к весу заряженной батареи составляет около 20—24 Wh/kg. В заряженном состоянии аккумуляторы могут без вреда долгое время стоять без повторного заряда.

Аккумуляторы Юнгера — NiFe-аккумуляторы. Готовятся шведской фирмой Akkumulator Aktiebolaget Jungner, Stockholm, по конструкции похожи на аккумуляторы Эдисона. Электролит, как в последних, KOH 21%, в химических превращениях участия не принимает, выделяется чего необходимо в очень незначительных количествах. Положительный полюс $Ni(OH)_2$, смешанный с графитом, отрицательный — кадмий, или железо, в виде тонкого порошка. При заряде напряжение повышается от 1,4 до 1,8 V. Разрядное напряжение падает от 1,3—1,4 до 1,1 V. По данным фирмы коэффициент полезного действия в отношении к Ah составляет 75%, в отношении Wh около 60%; мощность, отнесенная к весу, составляет около 20 Wh/kg. Короткие замыкания и чрезмерные заряды не оказывают вредного влияния. Саморазрядление ничтожно мало. При нормальном разрядном токе разряд должен быть прекращен при напряжении 1,1 V на элемент.]

е) Регулирование напряжения.

Так как напряжение аккумуляторов при заряде колеблется в весьма широких пределах, процесс заряда и разряда должен проводиться при соответствующем регулировании напряжения. В первом случае регулируется напряжение заряжающей машины, во втором случае — помощью элементного коммутатора — может быть включена и выключена часть аккумулятора. Коммутатор может работать автоматически при помощи реле. В тех установках, где аккумуляторы дают ток и заряжаются только в течение очень короткого промежутка времени (буферные батареи, стр. 1374) и где, следовательно, поддержание постоянного определенного напряжения батареи не имеет большого значения, последние обычно включаются параллельно шунтовым генераторам без специального элементного коммутатора

Полное число элементов батареи z выбирается следующим образом:

$$z = (E + \epsilon_{\max}) : \epsilon,$$

где E — требуемое напряжение в точках потребления,

ϵ_{\max} — максимальное имеющее место падение напряжения в сети,

ϵ — наиболее низкое напряжение одного аккумулятора. Последнее принимается:

в общих случаях $\epsilon = 1,83$ V,
в осветительных установках $\epsilon = 1,87$ V,
для буферных батарей $\epsilon = 2 - 2,1$ V.

Количество выключаемых элементов $z_2 = z - z_1$, если z_1 представляет число элементов, не подлежащих выключению.

При простом элементном коммутаторе (фиг. 1820) для числа не подлежащих выключению элементов принимают во внимание максимальное зарядное напряжение, которое может быть принято равным 2,1 V.

При двойном элементном коммутаторе (фиг. 1818 1819, 1821 и 1822) максимальное зарядное напряжение, которое может быть принято, 2,75 V.

Если ϵ_{\min} представляет потерю напряжения при минимальной нагрузке сети, то для числа элементов батарей получим следующие данные:

Число элементов	не подлежащих выключению	подлежащих выключению
При простом элементном коммутаторе	$z_1 = \frac{E + \epsilon_{\min}}{2,1}$	$z_2 = z - z_1$
При двойном элементном коммутаторе	$z_1 = \frac{E + \epsilon_{\min}}{2,75}$	$z_2 = z - z_1$

Таким образом число выключаемых элементов при двойном элементном коммутаторе значительно выше.

Число контактов коммутатора как при простом, так и при двойном коммутаторе может быть меньше числа подлежащих выключению элементов, если допустимы колебания напряжения около 4 V, что может иметь место в установках с напряжением 220 V и более. В противном случае должны быть предусмотрены вспомогательные элементы, или вспомогательные группы, для присоединения между каждым двумя контактами коммутаторов, что дает промежуточную ступень напряжения.

В трехпроводной установке вышеуказанные правила действительны для каждой половины сети.

Зарядное напряжение и добавочное напряжение (стр. 1206). Так как максимальное зарядное напряжение для одного аккумулятора составляет 2,75 V (до 2,85 V при заряде полным током) то необходимое зарядное напряжение батарей составляет $E_1 = 2,75 z$ вольт.

Столь большое напряжение на один элемент требуется только при первом заряде и может быть достигнуто либо переключением батарей на несколько параллельных групп, либо путем кратковременного повышения числа оборотов заряжающей машины. При нормальном заряде к моменту максимального напряжения выключаемые элементы, которые подвергаются меньшему разряду, могут быть выключены; при обычных условиях в числе около 15% нормального количества элементов. При этом для заряда отстающих элементов необходимо максимальное напряжение $E_1 = 0,85 \cdot 2,75 z$ вольт.

Если заряд выполняется с помощью специальных вольтдобавочных машин (стр. 1368), то при условии, чтобы в течение заряда лампы горели при нормальном напряжении, дополнительное напряжение ϵ_2 должно равняться:

$$\epsilon_2 = E_1 - (E + \epsilon_{\min}).$$

III. Электрические генераторы и моторы ¹⁾.

A. Общие положения и объяснение терминов.

Генератор (источник тока). Вращающаяся машина, преобразующая механическую энергию в электрическую ²⁾.

Электродвигатель. Вращающаяся машина, преобразующая электрическую энергию в механическую ³⁾.

Статор. неподвижная активная часть, ротор — вращающаяся активная часть машины.

Якорь. Часть машины, в обмотках которой, благодаря магнитному полю, возбуждается напряжение.

В асинхронных моторах проводится различие между первичным и вторичным якорем ⁴⁾.

Возбуждение. Магнитное поле вызывается возбужденным машиной.

Самовозбуждение. Ток возбуждения получается от самой машины.

Собственное возбуждение. Ток возбуждения получается от возбуждательной машины, непосредственно соединенной с главной машиной.

Независимое возбуждение. Ток возбуждения получается от постороннего источника.

Номинальная работа определяется теми данными, для которых машина построена, которые обозначены на табличке у машины. Этими данными являются: номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальная сила тока, номинальная частота, номинальное число оборотов, номинальный коэффициент мощности и т. д.

Данные относительно напряжения и силы тока при переменном токе представляют эффективные значения (стр. 1195); данные напряжения при трехфазном токе обозначают напряжение между фазами (стр. 1201).

¹⁾ Прошлал в нормы для испытания электрических машин, одобренные IX Электротехнич. съездом, см. журн. "Электротехнич.", № 15, 16, 1'28 г.

²⁾ Взаимодействие между полем и подвижной проводящей, стр. 1192.

³⁾ Взаимодействие между полем и проводом ом, по которому идет ток, стр. 1192.

⁴⁾ В нормах, одобренных IX Электротехнич. съездом, якорем называется вращающаяся активная часть в машинах с неподвижными полюсами.

Таблица 1. Нормальные номинальные напряжения в вольтах для машин.

Поступивший ток			Трехфазный ток: 50 пер/сек				Однофазный ток: 16 2/3 пер/сек			
Нормальное рабочее напряжение	Номинальное напряжение		Нормальное рабочее напряжение DI 196	Номинальное напряжение		Номинальное рабочее напряжение DI 196	Нормальное напряжение			
	Генераторы	Моторы		Генераторы	Моторы		Генераторы	Моторы		
110	115	110	125	130	125	220	—	220		
220	240	220	230	230	220	380	—	—		
440	460	440	380	400	380	6 000	6 300	6 000		
—	600*	—	500	525	500	15 000	15 750	15 000		
—	825*	—	3 000	3 150	3 000	—	—	—		
—	1 200*	—	5 000	5 250	5 000	—	—	—		
—	—	—	6 000	6 300	6 000	—	—	—		
—	—	—	10 000	10 500	10 000	—	—	—		
—	—	—	15 000	15 750	15 000	—	—	—		

*) Только для генераторов при электрификации транспорта.

Таблица 2. Нормальное число оборотов для машин переменного тока при 50 пер/сек.

Число полюсов	Число оборотов	Число полюсов		Число оборотов	Число полюсов	Число оборотов	Число полюсов	Число оборотов	Число полюсов	Число оборотов	
		Число полюсов	Число оборотов								
2	3 000	8	750	16	375	32	234	40	150	64	94
4	1 500	10	600	20	300	33	158	48	125	72	83
6	1 000	12	500	24	250	36	167	60	107	80	75

Приведенные значения относятся к синхронным числам оборотов. Отмеченных курсивом значений следует по возможности избегать.

Для 25 пер/сек число оборотов соответствует половине, для 16 2/3 пер/сек соответствует 1/3 приведенных значений. В машинах постоянного тока придерживаются несколько возможно тех же чисел оборотов.

Отдачей называется отданная мощность: для генераторов — к клемм его, для моторов — на валу, для умформеров — у вторичных клемм.

Потреблением называется полученная мощность: для генераторов — на валу его, для мотора — у клемм, для умформеров — у первичных клемм.

Коэффициентом полезного действия машины называется отношение отдачей к потреблению, **коэффициентом мощности** ($\cos \varphi$) называется отношение мощности (в kW или W) к кажущейся мощности (в kVA или VA), стр. 1197.

По отношению к изменению числа оборотов в зависимости от отдачи различают:

1) Моторы с постоянным числом оборотов. Число оборотов независимо от отдаваемой мощности (например, синхронные моторы).

2) Моторы с шунтовой характеристикой. Число оборотов при увеличении отдачи меняется незначительно (например, шунтовые моторы постоянного тока и асинхронные моторы).

3) Моторы с серийной характеристикой. Число оборотов сильно падает при увеличивающейся отдаче (например, моторы последовательного возбуждения, ревульсионные моторы).

4) Моторы с несколькими ступенями чисел оборотов. Моторы могут вращаться с несколькими определенными числами оборотов. Как общее правило, каждое из этих чисел оборотов приблизительно постоянно, соответственно пункту 2 (например, асинхронные машины с переключением полюсов).

5) Моторы с регулированием числа оборотов. Число оборотов в определенных пределах может быть точно устанавливаемо. Установленное число оборотов является либо почти постоянным в смысле пункта 2 (например, шунтовые моторы постоянного тока при изменении силы поля), либо при увеличении отдачи падает в смысле пункта 3 (например, ревульсионные моторы или коллекторные двигатели трехфазного тока с последовательным возбуждением, и те и другие с перестановкой щеток).

По способу охлаждения различают:

1) Естественное охлаждение. Охлаждающий воздух приводится в движение вращающимися частями машины без помощи специальных приспособлений.

2) Самовентиляция. Охлаждающий воздух приводится в движение крыльями, укрепленными на роторе, для соединенным с ним вентилятором, если он служит только для целей охлаждения.

3) Постороннее воздушное охлаждение. Охлаждающийся воздух приводится в движение вентилятором, работающим от постороннего мотора.

4) Водяное охлаждение. Машина охлаждается протекающей водой ¹⁾.

По способу защиты различают:

Открытые машины. Доступность токоведущих и вращающихся частей вачем не затруднена.

Защищенные машины. Защита против прикосновения, проникания посторонних тел, от падающих отвесно капель воды и от капель воды, которые могут проникнуть в любом направлении.

Закрытые машины выполняются закрытыми со всех сторон с фланцами для подачи и отвода воздуха, с охлаждением через кожух, т.е. с охлаждением самовентиляцией через наружные поверхности, с водяным охлаждением и как герметические машины.

Машины с предохранением против взрыва. Выдерживают либо внутри машины, либо внутри камеры для контактных колод взрывы проникающих взрывчатых газов. Принято, что давление взрыва не превышает 8 ат.

Форма выполнения электрических машин в конструктивном отношении обозначается согласно норм VDE следующим образом:

¹⁾ Если водяное охлаждение применено в машине только для подшипников, то такая машина в этой категории не относится.

Машины без подшипников $A_1 - A_8$, с подшипниками в кожухе через $B_1 - B_8$, машины с подшипниками в кожухе и отдельными подшипниками через $C_1 - C_8$, с отдельными подшипниками через $D_1 - D_{14}$, машины с вертикальным валом через $V_1 - V_7$, машины с вертикальным валом для присоединения к водяным турбинам через $W_1 - W_5$, мотор генераторы через $MG_1 - MG_9$, умформеры через $U_1 - U_2$.

[Высота оси электрических машин соответствует нормальным данным германской индустрии по нормам DIN.

Вращающий момент электрической машины в mkg равен

$$M_d = 973 N : n,$$

где N для моторов является отдачей, для генератора — потреблением в kW . Если значение N дано в ваттах, то приближенно $M_d = N : n$].

В. Машины постоянного тока.

На статоре расположены полюса с возбуждающей обмоткой для получения магнитного поля. На роторе расположены обмотки в которых возбуждается ЭДС при его вращении. Эта ЭДС равняется $E = Cn\Phi$ вольт, где $C = (z \cdot p/a \cdot 60) 10^{-8}$ представляет постоянную, зависящую от числа полюсов и рода обмотки якоря, при чем z представляет полное число проводников на якоре, a представляет половину числа параллельных ветвей, p — число пар полюсов. Коллектор и щетки в генераторе служат для отвода тока из якоря во внешнюю цепь, в моторе — для подвода тока к нему.

Концы всех обмоток подводятся обычно к клеммам.

[Обозначение зажимов в машинах постоянного тока (включая пусковые и регулирующие реостаты), принятое в Германии:

Якорь	$A - B$
Щитовые обмотки	$C - D$
Последовательные обмотки	$E - F$
Обмотки дополнительных полюсов или компенсационные обмотки	$G - H$
Постороннее возбуждение	$J - K$
Провод, независимо от полярности	L
Сеть двухпроводная (отрицательный и положительный полюс)	$N - P$
Сеть трехпроводная	$N - O - P$
Сеть нулевой провод	O
Пусковой реостат	L, M, R
Реостат в цепи возбуждения (с соединением со скользящим контактом)	$s - t$
Контакт реостата соответствующий выключению тока	q

При чем подлежат соединению:

L с N или P ,

M с C или D (в случае необходимости через реостат в цепи возбуждения),

R с A или B, E, F, G, H — смотря по схеме соединения, s с C или D — при самовозбуждении, s с J или K — при возбуждении от постороннего источника, q с D или C .

В дальнейшем применены следующие обозначения:

E — электродвижущая сила (ЭДС) в V ,

P — напряжение у якоря в V ,

I_a — сила тока в якоре в A ,

R_a — сопротивление якоря в Ω ,

I_e — сила тока в обмотке возбуждения в A ,

R_e — сопротивление обмотки возбуждения в Ω ,

N — мощность в kW ,

n — число оборотов в минуту,

I — сила тока во внешней цепи в A ,

R — сопротивление внешней цепи в Ω].

Измерения в машинах постоянного тока (стр. 1363).

Потери к коэффициент полезного действия (стр. 1364).

Таблица 3. Мощность, коэффициенты полезного действия и числа оборотов моторов постоянного тока (по нормам VDE 2000).

Мощность	Коэффициенты полезного действия при 110, 220, 440 В при числе оборотов в минуту						
	2 800	2 000	1 400	950	750	600	500
0,2	68	67	66	62	—	—	—
0,7	73	74	72	70	—	—	—
1,0	75	75	74	72	—	—	—
5	82	82	82	80	79	78	76
10	—	84	84	83	82	81	80
50	—	—	88,5	88	88,5	88	87
80	—	—	—	90	89,5	89	—
100	—	—	—	91	90	—	—

Другое соотношение для коэффициентов полезного действия даст Фишер-Гиннев¹⁾ для средних чисел оборотов и для удельной мощности $N_s = N \cdot 1000/n$, т. е. для мощности отнесенной к 1000 оборотов/мин.

Таблица 4. Коэффициенты полезного действия моторов постоянного тока (по Фишер-Гиннев).

N_s	0,5	1	2	4	8	15	30	60	120	240	500	1000	2000	4000	8000	16 000	kW
η	74	77	80	83	85	87	88,5	90	90,5	91	91,5	92	92,5	93	93,5	94	

Бесоткрытых машин постоянного тока.

$$G = C (N : n)^{3/4} \text{ kg. } N \text{ в ваттах.}$$

¹⁾ Lehrbuch für Elektrotechnik. Zürich, 1922, A. Raunstein.

$C = 60-65$ для машин с подшипниками во фланцах (0,5 до 100 kW) с самовентиляцией (стр. 1217);

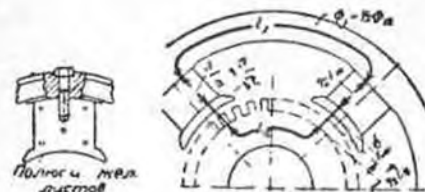
$C = 68$ до 72 для машин с двумя отдельными подшипниками (100 до 150 kW);

$C = 80-85$ для машин с тремя подшипниками (150—300 kW).

а) Конструкция и характер работы машины постоянного тока.

1. Обмотка возбуждения. Фиг. 1649 дает магнитную цепь машины постоянного тока. Если поток индукции Φ (полевой поток) и $\Phi_m = 1,1$ до 1,3 Φ (соответственно рассеянию полюсов от 10 до 30%), а также

отдельные поперечные сечения и длина участков известны, то по стр. 1191 может быть определено полное число ампер-витков Θ_m , которые необходимы, чтобы протолкнуть этот поток $\Phi\Phi_m$ через магнитную цепь. Соответствующее число ампер-витков должно быть вызвано обмотками в возбуждении обеих входящих



Фиг. 1648.



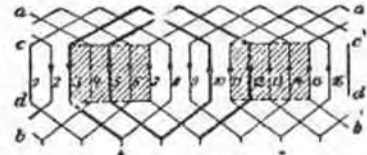
Фиг. 1649.

в цепь полюсов. Полюса большей частью состоят из склепанных штампованных листов (фиг. 1648), ядро из чугуна или стального литья.

2. Якорь и якорные обмотки. Для уменьшения потерь в железе вследствие намагничивания (стр. 1185) якорь составляется из штампованных, изолированных друг от друга железных листов (толщиной



Фиг. 1650.



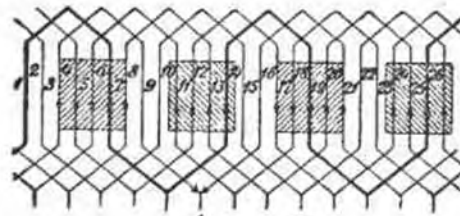
Фиг. 1651.

0,5 мм); в пазах его размещается обмотка якоря. В небольших машинах якорные пластины могут укрепляться непосредственно на вал (фиг. 1650). Для охлаждающего воздуха могут быть предусмотрены в пластине два или три выреза, благодаря чему образуется канал вдоль якоря. При больших диаметрах якоря необходимы особые, соответствующим образом сконструированные ступицы из чугуна или стального литья.

Для лучшего охлаждения якорь разделяется на пакеты шириной 7—10 см, которые отделены друг от друга каналами для воздуха шириной в 8—15 мм. Каналы для воздуха образуются при помощи распорок, припаянных или приваренных к несколько более толстым крайним л-

стам пакет, если охлаждение не производится с помощью осевых охлаждающих каналов. Пазы закрываются сверху клиновыми из фибры или дерева. Заменой последних в небольших машинах служат бандажки и стальные проволоки, которые воспринимают центробежную силу головок якорных обмоток. Головки якорных соединений (лобовые соединения) также предохраняются от действия невтроебной силы стальными бандажками. Якорная обмотка бывает петлеобразная [параллельная обмотка (фиг. 1651)], волновая [последовательная или серийная обмотка (фиг. 1652)] и последовательно-параллельная обмотка. Обмотка выполняется большей частью таким образом, чтобы стороны катушек могли быть совместно изолированы и вместе дежали в одном и том же пазу. Если это не имеет места, то мы имеем дело со ступенчатой обмоткой, применяемой, например, при тяжелых условиях коммутации.

При параллельной обмотке пять должны быть расположены между каждым из 2р полюсов. При последовательной обмотке число



Фиг. 1652.



Фиг. 1653.

петок может быть уменьшено и достаточно иметь их только в двух точках. Общее число проводов z обусловлено электродвижущей силой, которая должна образоваться в якорной обмотке. Распределение этого числа проводов по катушкам, каналам и т. д. производится на основании определенных правил обмотки ¹⁾ для того, чтобы якорная обмотка была выровнена с технической точки зрения в отпечада условиях надежности работы. Каждый виток состоит из двух проводов, а якорная катушка состоит из многих витков. Стороны каждой якорной катушки находятся друг от друга на расстоянии приблизительно одного полюсного шага, при чем одна находится в нижней части канала (вблизи стержней), а другая — в верхней части соответствующего канала (верхний стержень, см. фиг. 1653). Катушки якорной обмотки больших машин содержат часто только один виток; провода тогда носят также название стержней. Поперечное сечение проводов или стержней зависит от силы тока, протекающего в стержнях при нормальной работе.

Для выравнивания известной неизбежной неравномерности применяются часто при параллельной и многократных обмотках (последовательно-параллельные обмотки) уравнивательные или эквиво-

¹⁾ Arnold-L.-Cour. Die Gleichstrommaschinen, Bd. I, 3. Aufl. Berlin, 1924, Jul. Springer, Richter, Elektrische Maschinen, Bd. I, Berlin 1924, Jul. Springer.

тенциальные соединения, связывающие между собою определенные пункты обмотки, по которым и протекает уравнивающий ток.

Показателем использования якоря является величина мощности C в уравнении

$$N = C (D/100)^2 l (n/100),$$

где означают: D — диаметр якоря в см,

l — длина железа якоря в см,

n — число об./мин.

N — мощность в kW.

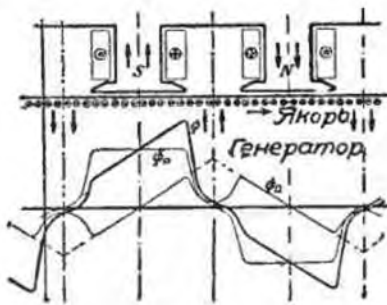
C — при нормально применяемых числа оборотов составляет приблизительно:

от 0,5 до 1,0	при диаметре якоря от	4 до 10	см
" 2,0 "	" 3,0 "	" 40 "	80 "
" 4,0 "	" 5,0 "	" 100 "	200 "

3. Реакция якоря. Распределение магнитной индукции в междуякорном пространстве машины постоянного тока изображается кривой магнитного поля. Последняя, при нагрузке, т.е. при прохождении тока через обмотку якоря, искажается, в нейтральной зоне, т.е. пункт, в котором кривая магнитного поля проходит через нуль, смещается, так как ампер-витки якоря вызывают в нем поле Φ_a , которое при несдвинутых щетках пространственно расположено перпендикулярно к оси главного поля (фиг. 1654). Максимального значения магнитное поле достигло бы в середине междуполюсного пространства, если бы там не была как раз ничтожна магнитная проводимость и поэтому не вызывалась бы



Фиг. 1654.

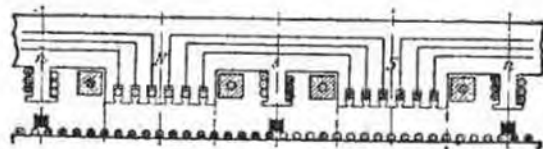


Фиг. 1655.

седловина в кривой якорного поля. Это фиктивное якорное поле Φ_a , сложившись с главным полем Φ , образует равнодействующее магнитное поле Φ_0 (фиг. 1655), которое в дальнейшем уже одно влияет на появление напряжений в обмотке якоря (полезный поток). При сдвиге щеток часть якорного потока непосредственно действует размагничивающим образом (реакция якоря). В этом случае ЭДС и вместе с этим напряжение у зажимов (генератора) повышается при нагрузке больше, чем это соответствовало бы омическому падению напряжения. Но даже в том случае, когда нет сдвига щеток, например, при машинах с добавочными полюсами (см. ниже), у машинах

постоянного тока наступает уменьшение магнитного потока вследствие того, что при искажении магнитного поля под влиянием якорного поля увеличение числа линий индукции на одном краю полюса, вследствие насыщения полюса, не соответствует убыли линий на другом краю полюса (реакция якоря).

4. Компенсационная обмотка. При тяжелых условиях работы, например, при трамвайных генераторах, генераторах для работы по схеме Леонарда (стр. 1242), а также при моторах с широкой регулировкой числа оборотов, необходимо реакцию якоря уничтожить применением компенсационной обмотки, расположенной на полюсных башмаках машины. Ампер-витки компенсационной обмотки должны оказывать действие, прямо противоположное ампер-виткам якоря, так, чтобы действие последних уничтожалось и чтобы якорное поле не могло образоваться (фиг. 1656).



Фиг. 1656.

5. Коммутатор и коммутация (перемена направления тока). Концы якорных обмоток подводится к коллекторным сегментам и там соединяются друг с другом. Эти сегменты изолированы один от другого пластинками слюды толщиной от 0,7 до 1,0 мм. Напряжение между двумя коллекторными сегментами должно быть настолько ниже напряжения вольтовой дуги, чтобы опасность возникновения устойчивой дуги была совершенно исключена. При этом следует принять во внимание, что при нагрузке распределение напряжения на коллекторе меняется соответственно искажению магнитного поля. При прохождении якорных проводов через нейтральную зону, т.е. когда они при нескаженной кривой магнитного поля проходят через середину междуполюсного пространства, наступает, вследствие действия коллектора, перемена направления тока в обмотке, при чем щетка замыкает накоротко две соседние пластины коллектора и лежащую между ними часть обмотки. Так как при прохождении тока по проводу, в особенности, когда он частично находится вблизи железа, образуется вокруг него магнитное поле Φ_s , то это поле рассеяния должно в момент короткого замыкания витков щеткой менять свой знак, вследствие чего в проводе и в относящемся к нему витке индуцируется электродвижущая сила $e_c = - \frac{d\Phi_s}{dt}$ (напряжение коммутации). Эта ЭДС, переходя определенные пределы, вызывает искрообразование под сбегающим краем щетки; величина ЭДС зависит от силы тока в якоря и от скорости вращения последнего. В случае нарушения упомянутых пределов следует принять меры к улучшению коммутации особыми вспомогательными средствами, сводящими к тому, чтобы

в том месте, где меняется направление тока в проводе якоря, создать магнитное поле, индуцирующее в проводе ЭДС-вращения, равную и противоположную напряжению коммутации и уничтожающую это последнее; таким образом устраняется причина искробразования. Это магнитное поле получалось ранее путем сдвига щеток за пределы действительной нейтральной линии (фиг. 1657¹⁾ (при генераторе по направлению вращения и при моторе в противоположном направлении), т.е. коммутация производилась в подходящем пункте главного магнитного поля.



Фиг. 1657.

В новейших машинах применяют вспомогательные полюса (добавочные полюса) между главными полюсами, которые так возбуждаются током нагрузки, протекающим в их обмотке, что в межжелезном пространстве вызывает соответствующую величину поле коммутации. Благодаря последовательному включению добавочных полюсов достигается то, что величина вспомогательного поля всегда соответствует образуемому током нагрузки напряжению коммутации. Для правильной коммутации требуется, чтобы коммутатор сохранял свою цилиндрическую форму, чтобы щетки не вздрагивали от сотрясения (неравномерность якоря) и чтобы изнашивание прокладок слэды происходило равномерно с изнашиванием медных сегментов. Очень часто поэтому приходится особым приспособлением выскрести слэду между медными сегментами.

Таблица 5. Плотность тока для щеток.

М а т е р и а л	Средняя плотность тока A/cm^2	ΔE вольт	Максим. плотность тока A/cm^2	ΔE вольт
Медь	10—25	0,017—0,03	40	0,04
Медная щетка, весьма тонкая (Bondgeux)	15—30	0,06—0,11	50	0,15
Проплавленный уголь	20—30	0,2	40	0,2
Уголь покрытый медью (Engelweit)	15—20	0,5—0,6	30	0,7
Уголь, весьма мягкий (графит)	8—11	0,4—0,6	20	0,7
„ мягкий	6—10	0,55—0,7	15	0,9
„ средней твердости	5—7	0,9—1,1	11	1,2
„ весьма твердый	4—5	1,2—1,5	9	1,6

При тяжелых условиях коммутации следует увеличить среднюю плотность и переходное сопротивление, чем увеличивается и ΔE . Ширина щетки оказывает влияние на число одновременно короткозамкнутых катушек и вместе с тем на условия коммутации. Медная щетка покрывает нормально от 1 до $1\frac{1}{2}$ пластин, а угольная — от 2 до $3\frac{1}{2}$. В опреде-

¹⁾ Изображение полей линиями определенного направления в сложивших их изгибающие сила является лишь приближительно точным, так как якорь неравномерно окружен железом.

ленных случаях следует для увеличения зоны коммутации выбрать ступенчатое расположение щеток, т.е. следует применить тангенциальное смещение части щеток на каждом отдельном стержне для щеткодержателя].

Хорошие условия коммутации зависят также от сорта употребляемой щетки, а в некоторых случаях коммутацию можно улучшить, заменяя мягкую щетку более твердой. Размеры угольных щеток установлены в Германии согласно норм DIN VDE 2900¹⁾.

[Вышеуказанная таблица 5 содержит допустимые и высшие плотности тока в A/cm^2 , а также переходное напряжение ΔE вольт для щетки при высшей плотности тока].

б) Генераторы постоянного тока.

Обозначение зажимов—см. стр. 1218, коэффициент полезного действия—см. стр. 1219, вес—см. стр. 1219.

О работе генераторов постоянного тока можно судить по определенным характерным кривым, которые строятся для постоянного числа оборотов генераторов.

Характеристика холостого хода показывает зависимость между силой возбуждающего тока I_e и ЭДС E .

Характеристика нагрузки показывает зависимость между силой возбуждающего тока I_e и напряжением на зажимах P при постоянной нагрузке I .

Внутренняя характеристика показывает зависимость между нагрузкой I и ЭДС E .

Внешняя характеристика показывает зависимость между нагрузкой I и напряжением на зажимах P .

Разница между внутренней и внешней характеристикой является омическим падением напряжения в машине.

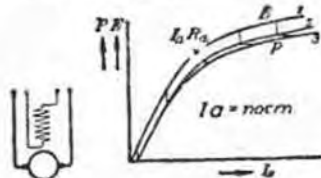
Возбуждение магнитного поля в машинах постоянного тока должно быть так рассчитано, чтобы при перегрузке в 25% и нормальном состоянии нагрева возможно было еще удержать номинальное напряжение. Машины делятся на:

1. Генераторы с независимым возбуждением. Схема соединения по фиг. 1658. Возбуждение магнитного поля получается от особого источника тока или особого возбудителя (самовозбуждение, см. стр. 1215).

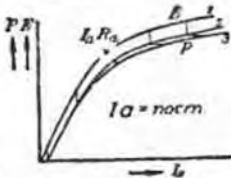
Регулировка напряжения производится путем изменения I_e помощью регулирующего сопротивления или регулированием напряжения возбудителя. Применяется только для определенных целей при требовании чувствительной или широкой регулировки напряжения: например, при возбудителях синхронных машин и динамо в схеме Леонарда (см. стр. 1242), а также при моторах, получающих ток от этих динамо. Характеристика холостого хода (фиг. 1659, кривая 1) соответствует кривой намагничивания (явление остаточного магнетизма во всех последующих характеристиках не принято во внимание). При постоянном возбуждении ЭДС пропорционально числу оборотов. Из-за реакции якоря (см. стр. 1222) и омического падения напряжения при нагрузке наступает уменьшение напряжения P на зажимах по отношению к ЭДС E ; характеристика

¹⁾ Нормы для щеток разрабатываются Главлентро ВСНХ СССР. Проект см. журн. «Электричество», № 15—16, 1928 г.

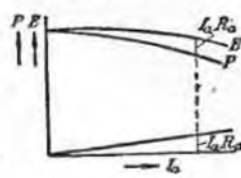
нагрузки бывает различна в зависимости от того, работает ли машина со сдвигом щеток или без такового (все машины с добавочными полюсами работают без сдвига щеток), а также имеет ли машина компенсационную обмотку (см. стр. 1223). Фиг. 1659 изображает характерные кривые нагрузки, при чем кривая 2 относится к генератору с ком-



Фиг. 1658.



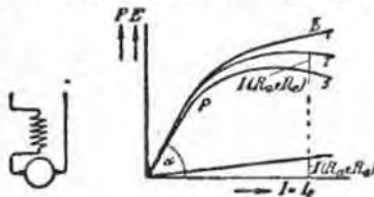
Фиг. 1659.



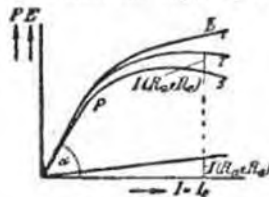
Фиг. 1660.

пенсационной обмоткой, а кривая 3 — к генератору без сдвига щеток. Фиг. 1660 изображает внутреннюю и внешнюю характеристику генератора с независимым возбуждением.

2. Генераторы последовательного серийного возбуждения (машины с возбуждением от главного тока). Схема соединения по фиг. 1661. Возбуждение производится током нагрузки ($I_e = I$). Регулирование напряжения в определенных пределах достигается шунтовым реостатом, присоединяемым к обмотке возбуждения. Характеристика при холостом ходе (здесь более подходит название характеристика намагничивания) см. фиг. 1662.



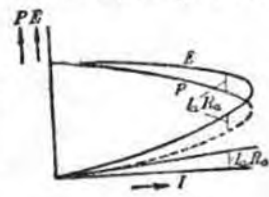
Фиг. 1661.



Фиг. 1662.



Фиг. 1663.



Фиг. 1664.

Кривая 1 соответствует кривой генератора с независимым возбуждением и может быть получена, как и в первом случае, путем опыта. Кривые 2 и 3 изображают внешнюю и внутреннюю характеристики при нагрузке. Уменьшение напряжения на щетках вызывается реакцией якоря и омическим падением напряжения в якоре и обмотке возбуждения $|I(R_a + R_e)|$. Для самовозбуждения требуется, чтобы $R + R_a + R_e < tg \alpha$, для чего необходимо достижение определенного минимального числа оборотов. Генераторы последовательного возбуждения, вследствие зависимости напряжения от нагрузки, мало применяются на практике (см. стр. 1234).

3. Шунтовые генераторы. Схема соединения по фиг. 1663. Возбуждение не получается от щеток якоря машины. До первого пуска машины в ход ее следует возбуждать от постороннего источника: благодаря явлению остаточного магнетизма в якоре индуцируется напряжение, которое при соответствующем соединении с обмоткой возбуждения усиливает магнит-

ное поле, что в свою очередь вызывает повышение напряжения и т. д. Наступающее насыщение магнитной цепи ограничивает дальнейшее повышение напряжения. В целях регулирования напряжения и цепи возбуждения включают шунтовый реостат, неподвижный при номинальной силе тока до $0,6 \times$ (номинальное напряжение). Характеристика при холостом ходе и характеристика нагрузки такие же, как при генераторе с независимым возбуждением (см. фиг. 1659, кривые 1, 2 и 3). Внешняя характеристика фиг. 1664 в верхней ее части, вычерченной сплошной кривой, соответствует нормальной работе, а нижняя часть кривой, обозначенная пунктиром, соответствует почти коротко замкнутой внешней цепи. Самовозбуждение возможно лишь при условии, если критическое сопротивление $R \geq tg \alpha$; в этой формуле α обозначает угол, образуемый в нулевой точке абсциссой и касательной к внешней характеристике. В том случае, когда обмотка возбуждения включена так, что она оказывает противоположное остаточному магнетизму, то самовозбуждения вообще не получается. Так как при увеличивающейся нагрузке получается лишь незначительное падение напряжения, то шунтовое возбуждение является самым рациональным для генераторов постоянного тока.

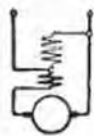
Изменением напряжения генератора постоянного тока с шунтовой или независимой обмоткой, при отсутствии специальных оговорок, называется увеличение напряжения, наступающее при переходе от номинальной работы к холостому ходу при условиях, что:

1. Число оборотов остается равным номинальному числу оборотов.
2. Щетки остаются в положении, предписанном для номинальной работы.

3. При самовозбуждении сопротивление цепи возбуждения, а при независимом возбуждении ток возбуждения, остаются без изменения.

Изменение напряжения составляет: при машинах с самовозбуждением с вспомогательными полюсами около 10 до 15%, а при машинах с независимым возбуждением около 6 до 10%.

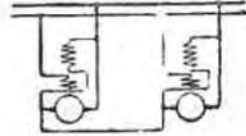
Применяются: при освещении, передаче силы, электролизе, сварке аккумуляторов. В последнем случае при обратном токе из батарей, например: вследствие малого возбуждения, полярность машин остается без перемены. Машина продолжает работать, как мотор с вращением в том же направлении.



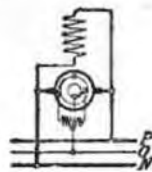
Фиг. 1665.



Фиг. 1666.



Фиг. 1667.



Фиг. 1668.

4. Генераторы со смешанной обмоткой (Компаунд генераторы). Схема соединения согласно фиг. 1665 и 1666. Возбуждение получается главным образом от щеток якоря, как при шунтовом генераторе, и, отчасти, от тока нагрузки, как при генераторе после-

довательного возбуждения. Соответствующий расчет последовательной обмотки позволяет компенсировать потерю напряжения в машине, так что напряжение на зажимах находится все зависимости от нагрузки. Возможно также компенсировать одновременно потерю напряжения в проводе до определенного пункта сети, так что напряжение в этом пункте оказывается независимым от тока, т. е. напряжение на зажимах генератора увеличивается соответственно нагрузке. Сохранение постоянства напряжения возможно в пределах от 1 до 2%.

При параллельной работе получают затруднения вследствие отсутствия разгрузки при потере напряжения. Поэтому применяют перекрещивание соединений обмоток последовательного возбуждения таким образом, что ток одного генератора служит добавочным возбуждением для другого генератора. Перемену полярности машины можно предотвратить применением уравнительного провода, соединяющего две несвязанные между собой в работе щетки одинаковой полярности (фиг. 1667).

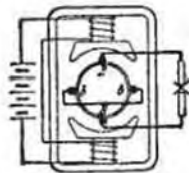
Применение: при судовых установках, при небольших трамвайных установках без применения буферной батареи.

5. Трехпроводные генераторы. Схема соединения согласно фиг. 1668. Шунтовое возбуждение. Применяются для питания трехпроводных сетей (стр. 1372). Кроме коллектора, якорь имеет также два контактных кольца; к последним присоединена дроссельная катушка, и которой получаемое на контактных кольцах переменное напряжение не вызывает значительного переменного тока, в то время, как уравнительный постоянный ток нулевого провода может беспрепятственно протекать через дроссельную катушку.

6. Турбогенераторы постоянного тока. В турбогенераторах постоянного тока с непосредственным соединением помощью муфты возникают при больших мощностях затруднения механического и электрического свойства (коммутация). С тех пор, как для самых больших мощностей ввели зубчатую передачу, позволяющую строить турбины с наиболее выгодным в отношении потребления пара числом оборотов, непосредственное соединение больше не применяется. Число оборотов этих турбин в большинстве случаев лежит значительно выше того предельного числа оборотов, для которого можно строить машины в работе генераторы постоянного тока. Зубчатая передача допускает применение нормальных генераторов, которые при низкой стоимости имеют более высокий коэффициент полезного действия, чем непосредственно соединенные быстроходные машины.

7. Генераторы на постоянном напряжении при переменном числе оборотов. Применяются для электрического освещения поездов, при передаче движения от оси вагона, а также для освещения автомобилей. Схема соединения, как у машины с поперечным полем (фиг. 1669. см. ниже) но с шунтовым соединением, т. е. якорные щетки *BB* присоединены к батарее и шунтовому возбуждению.

[Другие схемы соединения см. Büttner, *Beleuchtung von Eisenbahnpersonenwagen* 3 Aufl. Berlin 1925, Jul. Springer].



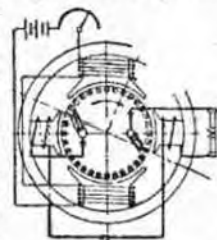
Фиг. 1668.

8. Генераторы постоянного тока при переменном внешнем сопротивлении. Применяются для питания угольной дуги в прожекторах и сварочных аппаратах (стр. стр. 891 и сл. 1), затем как вольтодобавочные или зарядные динамо, а также как регулирующие динамо для подъемных лебедок и т. п.

Машины с поперечным магнитным полем. Поле якоря, появляющееся в каждой динамомашине, перпендикулярно к главному полю (стр. 1222). Это поперечное поле оказывает вредное влияние; у обыкновенных машин оно устраняется правильным проектированием или особыми вспомогательными средствами. У машин с поперечным полем доктора Розенберга это поперечное поле служит для получения рабочего тока в щетках *BB*, расположенных перпендикулярно к этому полю, т. е. по направлению первичного поля. На фиг. 1669 показана несколько отличная от общепринятых форма двухполюсной машины с поперечным полем. В электромагнитах малого диаметра с большими полюсными башмаками происходит возбуждение первичного поля от батареи. Это поле индуцирует, как обыкновенно, напряжение на нормально расположенных щетках *bb*; ввиду короткого замыкания между щетками *bb*, даже при слабом первичном поле возникает сильный ток в якоре и сильное поперечное поле в направлении *bb*, которое и дает между щетками *BB* рабочий ток. Последний точно также проходит по секциям якоря и дает противоположное первичному третичное поле. Действительное поперечное поле вызывается таким образом разностью между первым и третьим полем.

Если от какой либо причины ток во внешней цепи усиливается, то усиливается и третье поле, чем ослабляется второе, действующее, и ток снова уменьшается до нормальной величины. Влияния характеристика таким образом сильно падает, она при малой силе тока высокая, а при большой — низка. Регулированием возбуждения достигается в известных пределах автоматическая установка на различную неизменяющуюся силу тока, которая не может быть презвождена также и при коротком замыкании. Поперечный ток I_g и полезный I соединяются в якоре и притом так, что при двухполюсной конструкции в двух четвертях его протекает сумма токов, в двух других — разность их.

Динамо для прожекторов запата Сименс Шуккерт (фиг. 1670). При помощи широких и сильных добавочных полюсов (стр. 1224), сдвига щеток и реакции якоря (стр. 1222) достигается такое изменение действующего поля, что напряжение меняется почти по прямой от наибольшей величины при открытой внешней цепи до нуля при коротко замкнутых щетках (напр., 125 V при 0 A и 0 V при 425 A). Таким образом получают такие же условия, как и при добавочном сопротивлении (что важно для прожекторов). Динамо применяется также для сварочных работ и для схемы Леонарда.



Фиг. 1670.

¹⁾ Moller, *Elektrische Lichtbogenweissung*, Leipzig, 1925, S. Hirzel.

Генераторы с полюсами, разделенными на две части. Фирма *GEC* см. *ETZ*, 1921, стр. 798.

Генераторы с встречной обмоткой компаунд. Требование дать при постоянном числе оборотов возможно независимый от напряжения, неизменяющийся, или ограниченный по силе ток выполняется машиной с самовозбуждением и независимым возбуждением, у которой ток нагрузки оказывает сильно ослабляющее обратное действие на полезное поле. Одно из возможных решений (по Кремеру¹⁾ показано на фиг. 1671.

На якоре *A* с рабочими щетками *B* в нормальном положении оказывают влияние, помимо компенсационной обмотки *c*, три магнитные поля, а именно: самовозбуждение *e*, независимое возбуждение *f* и встречная компаундная обмотка *g*, по которой проходит главный ток, ослабляющий независимое возбуждение *f*. Каждое изменение силы тока вызывает изменение напряжения, оказывающее свое действие на шунтовую обмотку самовозбуждения *e* и сводящее ток до величины, соответствующей независимому напряжению. Преимущество: поперечные щетки отпадают. Недостаток: машины имеют относительно много меди на магнитах. При висзанных сильных точках тока, благодаря самоиндукции *g* и *e* и остаточному магнетизму, установка на постоянную конечную величину силы тока происходит медленнее и менее надежно, чем при образовании противодействующего поля в самом якоре. Одно



Фиг. 1671.

только ограничение наибольшей силы тока (напр., при зацеплении груза у лебедок и т. д.) может быть достигнуто также без самовозбуждения с одним применением встречной компаундной обмотки *g*.

9. Униполярные машины. В этих машинах направление полезной части индукционных линий не подвергается изменению, вследствие чего в якорных стержнях без помощи коллектора получается постоянный ток.

Старшей машиной этого рода является диск Фарадея (1832 г.), от которого при вращении его между полюсами постоянного магнита, при помощи щеток скользящих по оси и по окружности, можно получить постоянный ток. В применимой практически машине Noeggerath (1904²⁾ значительной мощности с лежащими рядом одноименными полюсами впервые было в достаточной степени принято во внимание противодействие якору со стороны проводов и щеточных кабелей. Цилиндрическое тело якора из массивного железа содержит и уложенных в каналах якора проводов. Эти провода соединены последовательно посредством 2*n* контактных колец и *n* неподвижных обратных проводов. Стальной кожух с полюсами, обнимающий якорь, содержит выемки для прохода обратных проводов, для щеток, расположенных спирально на контактных кольцах, в двух концентрически к якору расположенных возбуждающих катушек. Машины мощностью от 300—500 kW с числом

¹⁾ *ETZ*, 1909, S. 798.

²⁾ *ETZ*, 1905, S. 831.

об./мин. от 2000 до 3000, соединенные с турбинами, дали удовлетворительные результаты (построены фирмами *GEC* и *SSW*¹⁾).

Униполярная машина в особенности применима для большой силы тока при небольшом напряжении, например для электро-химических целей.

10. Регулирование напряжения. Регулирование напряжения достигается в редких случаях изменением числа оборотов, большей же частью изменением силы тока возбуждения помощью реостата с чувствительной регулировкой, включенного в цепь возбуждения (регулятор возбуждения или регулятор напряжения). Реостат в большинстве случаев представляется непосредственно от руки, а в некоторых случаях — рычагом или зубчатой передачей. При выключении возбуждающей обмотки последнюю следует коротко замыкать, чтобы индуцируемое при исчезновении главного магнитного поля высокое напряжение не могло пробить обмотки. Это особенно важно при напряжениях возбуждения, превышающих 50 вольт. Для этой цели реостат снабжается специальным контактом для короткого замыкания²⁾, или же контактом, замыкающим возбуждающую обмотку через безындуктивное сопротивление; при перестановке реостата от руки применяются угольные контакты и медленно действующее выключение (тушение искры и постепенное уменьшение силы тока). В особых случаях следует параллельно возбуждению включать безындуктивное сопротивление, равное по величине 4—5-кратному омическому сопротивлению обмотки возбуждения. Кроме того выполнение обмотки на медных остовах, или применение специальных обмоток, вызывающих затухание, позволяет производить висзальное выключение возбуждения без всякой опасности. При машинах последовательного возбуждения регулирование можно производить помощью регулирующего реостата, включенного параллельно возбуждению. Автоматическое регулирование напряжения получается при помощи реле, пускающего в ход небольшой мотор, который в свою очередь переставляет регулирующий реостат в соответствующую сторону. Весьма выгодно такое приспособление в установках с сильными, но не кратковременными колебаниями нагрузки. В некоторых случаях применяются также быстро действующие регуляторы (стр. 1258), в особенности при переменном числе оборотов: напр., при генераторах для освещения посков.

Автоматическое регулирование посредством вспомогательной обмотки имеет место при генераторах со смешанным возбуждением. Для больших осветительных установок применяется в настоящее время редко (изменение напряжения, вызываемое нагретом динамо, требует все равно дополнительного регулирования помощью шунтового регулятора), но зато чаще применяется при судовых установках, где требуется, несмотря на отсутствие постоянного ухода за машиной, чтобы при переменной нагрузке напряжение оставалось достаточно постоянным. При установках с сильно и быстро меняющейся нагрузкой (весьма много в среднем трамвайные установки без буферной батареи) применение генераторов со смешанным возбуждением может быть рекомендовано (см. стр. 1227).

¹⁾ Сравн. Trettin, Der heutige Stand der Unipolarmaschine, Dingler Pol. J. 1913, Heft 9 u. 10.

²⁾ Контакт *g*, стр. 1218.

11. Параллельное соединение, параллельная работа и распределение нагрузки. Параллельное соединение генератора постоянного тока с другим генератором, или с аккумуляторной батареей (часто через собирательные шивы), требует равенства напряжений с источником тока, находящимся уже в работе, а также правильной полярности. Оба испытания могут быть произведены помощью вольтметра с подвижной катушкой (см. стр. 1337).

Параллельная работа при колеблющейся нагрузке возможна только в случае одинаковых нагрузочных характеристик мотора; в таких случаях применяется компаундная обмотка.

Принятие на себя нагрузки трехфазным генератором после параллельного включения производится увеличением его возбуждения. Разгрузка генератора при параллельной работе достигается путем уменьшения его возбуждения. Разгрузка батарей при параллельной работе производится выключением элементов элементным коммутатором.

с) Электромоторы постоянного тока.

Обозначение зажимов см. стр. 1218; коэффициент полезного действия см. стр. 1219; вес см. стр. 1219.

Для того, чтобы судить о качествах работы мотора постоянного тока, а в особенности об его отношении к изменению числа оборотов (см. стр. 1216) служат характеристики, которые целесообразнее всего составляются в зависимости от момента вращения мотора. Характеристика числа оборотов изображает, следовательно, число оборотов в зависимости от момента вращения.

1. Принцип работы. Как только к якорию машины постоянного тока помощью коллектора подводится напряжение, сейчас же вследствие взаимодействия между магнитным полем Φ и якорным током I_a в проводах a устанавливается момент вращения величиной:

$$M_d = \frac{I_a z}{9,81 \cdot 2\pi} \cdot \frac{p}{a} 10^{-8} \text{ нмкг} \text{ или } M_d = C I_a \Phi,$$

где C находится в зависимости от рода обмотки якoria и числа полюсов. Благодаря моменту вращения происходит ускорение движения якoria до того времени, пока ЭДС вращения в якоре $E = C \Phi n$ (см. стр. 1218), принимая во внимание реакцию якoria, не окажется равной включенному напряжению минус омическое падение напряжения в якоре. Итак, число оборотов увеличивается пропорционально увеличению напряжения и уменьшению магнитного потока индукции. Общими этими принципами пользуются при регулировании числа оборотов (см. стр. 1238). Увеличивающемуся моменту вращения при нагрузке соответствует при равном потоке более сильный ток якoria.

Реакция якoria (см. стр. 1222) отражается на моторе в том смысле, что ослабление магнитного поля вызывает уменьшение падения числа оборотов; причиной этого падения и свою очередь является омическое падение напряжения в якоре.

2. Конструкция (стр. 1226). Конструкция моторов постоянного тока такова же, как конструкция динамомашин постоянного тока, однако, в зависимости от условий эксплуатации, к моторам часто предъявляют

другие требования: например, требование компактной и защитной конструкции. Стапипа магнитов получает часто у моторов форму закрытого кожуха, прикрывающего движущиеся части; последние оказываются при этом менее доступными, но зато они лучше защищены от повреждений. Подшипниковые щиты часто делают также совершенно закрытыми (например, трамвайные и крановые моторы), или же в них оставляют отверстия для входа и выхода воздуха (охлаждение помощью вентилятора сидящего на валу мотора).

Род защиты моторов—см. стр. 1217.

На фиг. 1672 изображен 4-полюсный мотор фирмы S. S. W. с собственным охлаждением, мощностью 12 kW на валу мотора, при числе об. мин. = 1400, с вентилятором для охлаждения мотора на стороне ремennого шкива.

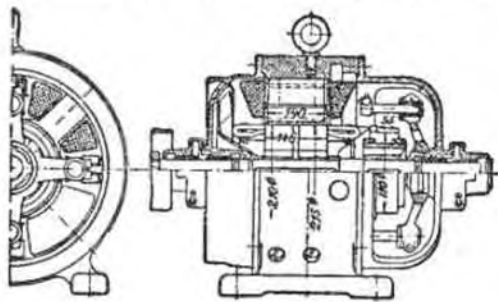
3. Схема соединения. Точно так же, как при генераторах постоянного тока (см. стр. 1225), различают в зависимости от системы возбуждения следующие типы моторов:

Моторы с независимым возбуждением.

Если возбуждение включено в цепь с постоянным напряжением, то величина магнитного поля Φ , за исключением незначительного изменения, вызываемого реакцией якoria, тоже остается постоянной. Число оборотов находится в зависимости от напряжения у якoria. Применяется в установках, где требуется регулировка не числа оборотов в широких пределах: напр., при моторах для подъемников, для прокатных машин, а также при схеме Леонарда (см. стр. 1232).

Шунтовые моторы (таблица 6, стр. 1210). При включении в цепь постоянного напряжения величина магнитного поля Φ , как и выше, остается постоянной, если не считать незначительного изменения, вызванного реакцией якoria. Число оборотов соответствует напряжению на зажимах за вычетом омического падения напряжения в якоре, которое с увеличением нагрузки понижается соответственно увеличению силы тока. При увеличении нагрузки с падением напряжения падает также число оборотов шунтового мотора, но весьма незначительно, так как падение напряжения при не очень малых моторах составляет только несколько сотых долей напряжения на зажимах (моторы с шунтовой характеристикой см. стр. 1217). Регулирование числа оборотов стр. 1238. Изменение направления вращения достигается изменением направления тока в якоре или в возбуждении.

Моторы с последовательным возбуждением (Сервис моторы) (таблица 6, стр. 1210). Магнитное поле Φ не является здесь величиной постоянной, а зависит от нагрузки, так как вместе с последней увеличи-



Фиг. 1672.

вается ток I , являющийся также током возбуждения. При слабой нагрузке ток I , а следовательно и Φ , малы, поэтому и достигает значительной величины (изменение числа оборотов моторов с серийной характеристикой см. пункт 3, стр. 1217) Сервис-моторы, включенные в сеть постоянного напряжения без нагрузки, могут по этой причине «блестеть». При трогании с места ток I велик, а вместе с ним и магнитное поле. Сервис-мотор имеет поэтому большой пачальный крутящий момент. По этой причине, а также вследствие падения числа оборотов при увеличивающейся нагрузке, эти моторы подходят для крановых и железнодорожных установок (см. стр. 105 и том III, отд. ж.-д. установок). Регулирование числа оборотов в определенных пределах достигается включением шунтового сопротивления параллельно обмотке возбуждения. Изменение направления вращения получается при изменении направления тока в обмотке возбуждения или в ягоре. В некоторых случаях оказывается выгодной передача энергии сервисному мотору от отдельного серийного генератора. Число оборотов мотора в этом случае при подходящем подборе внешней характеристики генератора остается постоянным.

Сервисный генератор, пускаемый в ход как мотор, вращается в противоположном направлении. Если же сервисный мотор, работая как генератор удерживает свое первоначальное направление вращения, то меняется направление тока. Крановые моторы постоянного тока номинальной мощности от 0,8 до 100 kW при 25% продолжительности включения (см. стр. 152) в отношении напряжения и числа оборотов должны соответствовать в Германии нормам D.N VDE 2010. Размеры свободных концов вала в зависимости от мощности соответствуют нормам DiN VDE 2105. Цилиндрические и конические концы вала для крановых моторов соответствуют нормам D.N VDE 2701 в 2702. Весьма желательны одинаковые главные размеры для крановых моторов постоянного и трехфазного тока одинаковой мощности, а именно: высота осей, ширина фундаментных ножек, отверстия для болтов, очертания свободных концов валов. Мощность крановых моторов оценивалась до сих пор полагая «временная мощность» для продолжительности работы в 30, 45, 60 и 90 минут, в последнее же время это заменено понятием «прерывистой мощности», соответствующим «относительной продолжительности включения» (см. стр. 1352) в 15, 25 или 40%.

Моторы компаунд (таблица 6, стр. 1240). В шунтовых моторах с широкой регулировкой числа оборотов (стр. 138) путем изменения возбуждения оказывается необходимой слабая последовательная обмотка возбуждения для выравнивания реакции якоря (стр. 1222), возрастающей при увеличении нагрузки вследствие возрастания силы тока. Реакция якоря при ослабленном поле имеет сравнительно большее влияние, чем при нормальном поле.

4. Пуск в ход. Шунтовые моторы пускают в ход с включенным полным возбуждением, постепенно выключая присоединенное к якорю дополнительное сопротивление R . При выключении мотора необходимо сперва выключать якорь, а затем возбуждение. Соединение пускового реостата и выключателя возбуждения желательно производить таким образом, чтобы ошибки в последовательности включения и выключения

оказались невозможными. Для больших шунтовых моторов, пускаемых в ход под нагрузкой, металлические реостаты оказываются слишком громоздкими, так что вместо них применяют часто шунтные реостаты. Для пуска в ход сервисных моторов вполне достаточны реостаты с сопротивлением средней величины (см. стр. 1237). При возможности применяется кратковременное последовательное соединение двух моторов (напр., на трамваях).

Для определения продолжительности времени t пуска в ход для моторов до 200 kW применяется формула:

$$t = 4 + 2 \sqrt{N sk},$$

(N —мощность мотора в kW). Формула применима в тех случаях, когда вращательные массы, которые нужно привести в движение, оказываются не слишком велики.

Пусковые реостаты должны быть рассчитаны так, чтобы они соответствовали колебаниям между наибольшей величиной тока—«пусковой максимальной ток» и наименьшей величиной тока—«ток выключения». Величина пускового максимального тока (и пускового момента вращения) ограничена условиями коммутации.

При включении мотор, находящийся в первый момент в состоянии покоя, еще не развивает противодействующей ЭДС, и потому сила тока достигает максимального значения $I_{\max} = P : R_1$; $R_1 = R' + R_a + R_s$ при сервисных моторах и $R_1 = R' + R_a$, при шунтовых моторах, где R' означает дополнительно включаемое сопротивление. В моторе благодаря этому развивается пусковой момент вращения, соответствующий току I_{\max} . Пусковой момент превышает нормальный момент M_n , соответствующий номинальной силе тока I , в отношении $I_{\max} : I$ для шунтовых моторов, а для сервисных моторов — почти соответственно квадрату этого отношения. Благодаря этому происходит ускорение вращения якоря (в соответствующих случаях также приводимого во вращение вала с нагрузкой). Противодействующая электродвижущая сила увеличивается пропорционально числу оборотов, достигая значения E_1 , при чем ток падает до величины

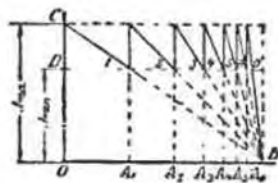
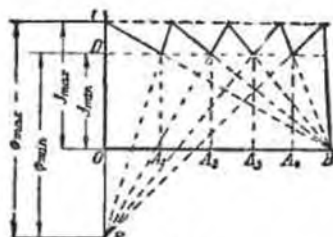
$$I_{\min} = (P - E) : R_1.$$

Путем уменьшения общего омического сопротивления до величины R_2 может быть получен новый ускорительный толчок тока $I_{\max} = (P - E) : R_2$ и т. д. Колебания силы тока при пуске в ход между этими высшей и нижней величинами связано условием, что ступени омического сопротивления соответствуют геометрическому ряду $R_2 = \alpha R_1$, $R_3 = \alpha^2 R_1$, $R_4 = \alpha^3 R_1$, где $\alpha = I_{\min} : I_{\max}$ и H_1, R_2, R_3, \dots обозначают общее сопротивление. Если I_{\max}, I_{\min}, R_a и R_s даны, то путем расчета можно найти омическое сопротивление и число ступеней пускового реостата. Графическое определение сопротивлений для шунтового мотора

¹⁾ При условии, что ток не ослабляется самоиндукцией цепи (см. стр. 1185), благодаря которой при особых пусковых условиях и подходящем соединении даже большие моторы могут быть пущены в ход без помощи реостата (см. ETZ, 1912, стр. 759). Моторы мощностью до 1 kW могут быть пущены в ход без помощи реостата (сервисные моторы — нагрузкой, шунтовые — без нагрузки).

по Гергесу ¹⁾ показано на фиг. 1673; он дает зависимость тока I от числа оборотов n :

согласно прямой 1 для общего омического сопротивления $R_1 = R' + R_a$, согласно прямой 2 для общего омического сопротивления $R_2 = R'' + R_a$ и т. д., согласно кривой 0 для общего омического сопротивления $R_0 = 0 + R_a$.

Фиг. 1673 ²⁾.Фиг. 1674 ²⁾.

Общие омические сопротивления R_1, R_2, R_3 и т. д. относятся друг к другу как отрезки OB, A_1B, A_2B и т. д.

Так как $R_1 = P : I_{\max} = R' + R_a$ (последняя ступень $R_0 = R_a$) то для n ступеней:

$$R_n = a^{n-1} \cdot P : I_{\max} \text{ или } \lg a = (1 : n) \lg (I_{\max} R_a : P).$$

Отсюда может быть определено a , когда даны I_{\max} и n .

$I_{\max} R_a$ представляет потерю в ядре, вызванную током I_{\max} . Для средней величины мотора можно принять I_{\max} равным приблизительно 1,5 или 2-кратному значению I , а I_{\min} немного больше I . В случае, если первый толчок тока I_{\max} оказывается слишком сильным, то следует включить еще несколько ступеней так, чтобы ток включения получался ниже максимального пускового тока.

Для пусковых реостатов серпентинных моторов можно применить подобный же математический и графический метод ³⁾. Прямые линии в фиг. 1673 при рассматриваемом серпентинном моторе переходят в характеристики для $n = f(I)$. В том случае, когда отношения между индукционными потоками при I_{\max} и I_{\min} , а именно $\Phi_{\max} : \Phi_{\min}$ известно, получается возможность определить ступени по фиг. 1674 соответственно тому, как это делалось при шунтовых моторах. Точка E определен таким образом, что отношение $CE : DE$ равно $\Phi_{\max} : \Phi_{\min}$. Положение пункта E зависит таким образом от насыщения мотора; если насыщение большое, то E лежит бесконечно далеко, так что диаграмма сходится с диаграммой шунтового мотора; если же насыщение небольшое, пункт E совпадает с O . Из фиг. 1674 видно, что количество ступеней пускового реостата для серпентинных моторов значительно меньше, чем для шунтовых.

¹⁾ ETZ, 1894, S. 644.

²⁾ Вместо I_{\max} , I_{\min} должно быть I_{\max} , I_{\min} .

³⁾ ETZ, 1923, S. 381.

В отношении количества предварительных и главных ступеней для реостатов при моторах мощностью тока от 1,5 до 100 кВт установленным нормам согласно «правилам устройства и испытаний пусковых реостатов и приборов для управления» RFA 1925 (Генерал-Германский Электротехнический).

Пусковые реостаты обслуживаются непосредственно от руки, или же, если это требует условия, при помощи зубчатой передачи или системы рычагов. Если для включения реостата применяется вспомогательный электрический ток, процессе пуска может быть по проведению начал и прерван, или он может быть от руки произвольно начат и заканчиваться автоматически (напр., управление посредством нажимных кнопок), или же процесс может быть автоматически начат и окончен (самодействующий пусковой реостат). Пусковые реостаты применяются металлические или жидкостные.

Металлические пусковые реостаты часто изготовляются из проволоки, спирально навитой на стержень, диаметром равный 8 или 9-кратному диаметру проволоки, в ядра выгнутой по оси и навитой в желобки фарфоровых цилиндров, или же помещенной в проволочные тенты и изолирующее вещество (масло, последнее время также песок, а для небольших мощностей эмали).

Материал проволоки: никелин, нейзильбер или подобные сплавы без железа с высоким удельным сопротивлением (см. стр. 1180); как вспомогательный материал, применяется иногда и железо (полируется действием ржавчины—персичко). Плотность тока для никелина и нейзильбера (12 до 15) $d\sqrt{V}$, где d обозначает диаметр проволоки в мм. Для железа приблизительно (20 до 25) $d\sqrt{V}$. При сильных токах часто применяются сопротивляемые в виде лент незначительной толщины (0,3 до 0,5 мм) из металлов с высоким сопротивлением; как вспомогательный материал—железные полосы толщиной 0,3 до 0,5 мм для нагрузки от 30 до 50 А на 1 см ширины. При сильных токах, действующих в течение короткого времени, допускается значительно более высокая нагрузка—при условии некустарного охлаждения помощью вентилятора. Для пусковых реостатов могут быть также с успехом применены зигзагообразные чугунные полосы, соединенные последовательно, или же параллельно, помощью болтов с соответствующей изоляцией.

Жидкостные пусковые реостаты состоят из сосудов, наполненных электролитом (часто вода с примесью соды), и подвижных железных плит; для больших мощностей плиты несодяжны, изменение и регулирование уровня жидкости производится помощью насоса. В случае применения жидкостных пусковых реостатов для постоянного тока следует остерегаться образования гремучего газа.

Нагрев пусковых реостатов и регуляторов при правильном пользовании не должен превышать следующих величин (§ 13, RFA):

1. Реостаты с воздушным охлаждением. Повышение температуры, измеренное в месте выхода воздуха, не должно превышать 175° и ни в каком месте корпуса повышении температуры не должно быть выше 125°.

2. Реостаты с масляным охлаждением. Повышение температуры масла в самом теплом месте между элементами реостата не должно превышать 80° .

3. Реостаты с песчаным охлаждением. Повышение температуры песка между элементами реостата не должно превышать 150° .

4. Водяные реостаты с примесью соды и т. п. Повышение температуры электролита не должно превышать 60° .

5. Ступенчатые выключатели. Повышение температуры контактов ступенчатых выключателей в воздухе ни в коем случае не должно превышать 40° . Для контактов, находящихся в масле, допускается температура, равная температуре масла.

5. Регулирование числа оборотов. Характеристика крутящего момента в числа оборотов показывает зависимость между числом оборотов и крутящим моментом. Следует различать следующие главные виды регулирования числа оборотов согласно КЕА § 27: при постоянном крутящем моменте — крутящий момент независим от числа оборотов (напр. поршневой насос); при постоянной мощности — произведение крутящего момента на число оборотов не зависит от числа оборотов (напр., токарный станок);

при крутящем моменте возрастающем пропорционально квадрату числа оборотов (напр., вентилятор).

Для регулирования числа оборотов моторов постоянного тока применяются главным образом следующие способы (пусковые приспособления, см. стр. 1235):

1. Регулирование изменением силы магнитного поля (увеличение числа оборотов помощью реостата в цепи возбуждения). Число оборотов мотора постоянного тока при постоянном напряжении у якоря увеличивается или уменьшается обратно пропорционально силе магнитного поля. Помощью регулирующего реостата, включенного при шунтовых моторах последовательно с обмоткой электромагнитов, а при серийных моторах — параллельно к ней, можно менять число оборотов в довольно широких пределах при постоянном почти коэффициенте полезного действия, т. е. практически без потерь. При изменении нагрузки шунтовых моторов число оборотов их остается почти без перемены. Нормальные моторы допускают регулировку в пределах около 15% (до 25%). При необходимости более широкого изменения числа оборотов следует применять особые моторы, которые при наибольшем числе оборотов работают при слабом возбуждении магнитного поля. Для открытых моторов постоянного тока, мощностью от 1,1 до 80 kW, от 1,1 до 64 kW и от 1,1 до 32 kW, в пределах регулирования соответственно 1:1,5, 1:2 и 1:3 установлены для числа оборотов и коэффициентов полезного действия особые нормы согласно DIN VDE 2001¹⁾.

Так как в основу расчета якоря кладется максимальный ток, то при регулировании изменением силы магнитного поля следует брать моторы такой величины, чтобы они оказались в состоянии развить максимальную мощность при наименьшем числе оборотов (следует обратить особое вни-

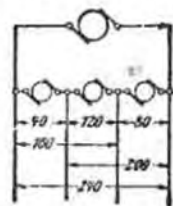
мание на реакцию якоря при слабом магнитном поле, применяя добавочный полюс; для устранения колебания, а также для предохранения от разброса мотора, применяется вспомогательная компаундная обмотка; сравни также стр. 1223.

2. Регулирование реостатом, включенным в цепь якоря (уменьшение числа оборотов помощью регулирующего пускового реостата цепи главного тока). С экономической точки зрения этот способ верационален, так как потеря энергии в реостате непосредственно зависит от силы тока. Кроме того размеры реостата, который должен быть рассчитан на полную нагрузку мотора, оказываются очень велики, вследствие чего и стоимость его удорожается. При постоянном крутящем моменте вся разница между расходами энергии при полном числе оборотов и уменьшенном числе оборотов теряется в реостате, так что расход энергии в действительности не меняется. При уменьшающемся крутящем моменте, — напр., в случае привода центробежных насосов, вентиляторов и т. д. уменьшается также расход энергии, так как реостатом поглощается только произведение силы тока на потерю напряжения; сила тока же падает вместе с моментом кручения, который при вентиляторах, при прочих неизменных условиях работы, уменьшается при вращении пропорционально квадрату числа оборотов. С экономической точки зрения этот способ является более или менее удовлетворительным только при переменном моменте вращения, но зато применяется часто при небольших моторах и незначительной регулировке из-за дешевизны начального устройства, так как это позволяет брать моторы нормального типа. С изменением нагрузки меняется поглощаемое напряжение, а вместе с тем и число оборотов.

3. Изменение якорного напряжения применением многопроводной сети. В случае необходимости установки большого количества моторов с изменяющимся числом оборотов полезно создать, с помощью двух или больше соединенных между собой динамо, трех- или многопроводную сеть и якорям отдельных моторов попеременно сообщать отдельные напряжения. Регулирование без потерь: см. ниже также фиг. 1675, изображающую четырехпроводную систему с напряжением в 210 V между крайними проводами; при такой системе в якоря мотора могут быть образованы 6 различных, равномерно возрастающих, напряжений. Помощью изменения магнитного поля (с 1:2 до 1:1,2) достигается чувствительная, не связанная с потерями регулировка по всей регулируемой части (1:1).

[Выбор возрастающих в геометрической прогрессии напряжений в 60, 80, 110 V дает 6 ступеней: 60, 80, 110, 140, 160, 230 (1:4,16), в пределах которых все числа оборотов могут быть достигнуты помощью регулирования магнитного поля в отношении 1:1,3.

4. Присоединение к динамо управления. Напряжение динамо (для управления), питающего двигатель, меняют помощью шунтового реостата в пределах от нуля до его максимальной величины. Большое преимущество этого соединения состоит в том, что число оборотов,

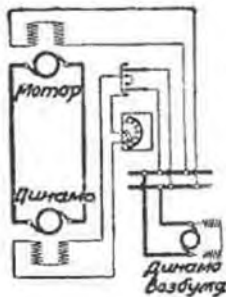


Фиг. 1675.

Схема соединения		Шунтовый мотор	Мотор с постоянными соединением (серво-мотор)	Мотор со смешанной обмоткой (компаунд)
Характеристика				
Пуск в ход	<ol style="list-style-type: none"> 1. Без реостата (до 1 кВт без нагрузки) 2. С реостатом в цепи якоря 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Без реостата (до 1 кВт с нагрузкой) 2. С добавочным сопротивлением (в некоторых случаях временное последовательное соединение двух моторов) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Без реостата (до 1 кВт с нагрузкой). 2. С добавочным сопротивлением (в некоторых случаях временное последовательное соединение двух моторов) 	<ol style="list-style-type: none"> 2. Реостаты в цепи якоря
	3. Без потерь при схеме соединения Леонарда при увеличении напряжения от 0 до максимальной величины.			

Крупный момент при пуске в ход	$M_{дпуск} \leq 1,8 M_{дном.}$ При 1 включено мал.	$M_{дпуск} \leq 3 M_{дном.}$ При 2 $\leq 2 M_{дном.}$ при часовой мощности	$M_{дпуск} \leq 2 M_{дном.}$	$M_{дпуск} \leq 2 M_{дном.}$
Пусковой ток	$I_{пуск} \geq 1,8 I_{ном.}$ При 1 до 10 $I_{ном.}$	$I_{пуск} \geq 2,5 I_{ном.}$ При 2 $\geq 1,8 I_{ном.}$ (при $N_{час.}$)	$I_{пуск} = 2,5$ до 8 $I_{ном.}$ В зависимости от величины потерь возбуждения.	$I_{пуск} = 2,5$ до 8 $I_{ном.}$ В зависимости от величины потерь возбуждения.
Регулирование числа оборотов	Уменьшение числа оборотов по мере регулирования по схеме Леонарда. Регулирование в широком диапазоне числа оборотов по мере изменения реостата в цепи возбуждения возможно. При обмоточных моторах — до 1,15 \times номин. числа оборотов, при обмоточных — до 3 \times номинальн. числа оборотов.	Изменением напряжения якоря помощью добавочного сопротивления (в некоторых случаях помощью реостата, включенного параллельно возбуждению). Регулировка возможна в широком пределах.	Как при моторе с последовательным соединением Последовательная обмотка часовой так рассчитана, что возможно увеличение числа оборот. на 15%/о	Как при моторе с последовательным соединением Последовательная обмотка часовой так рассчитана, что возможно увеличение числа оборот. на 15%/о
Номинальное напряжение	При 3. При схеме Леонарда прибл. до 20% помин. числа оборотов без потерь помощью регулируемой напряжением дуговой машины.			
Цепление	<ol style="list-style-type: none"> 1. Для подвесных электрических цепей. 2. При всех установках, требующих постоянного числа оборотов насосов, вентиляторов, ткацкие машины, машины-орудия. 3. Прокатные станы, шахтные подъемники, тяговые стальные станины. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Для подвесных электрических цепей 2. При трамваях, вагонах для прокатных станов, фаянза, перепильных станках. 3. При тяжелых установках с часовой пуском в ход. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Для агрегатов Леонарда, как пусковой двигатель, и при моторах вальцовочных станков 	

даже мощных типовых моторов может быть заменено без значительных потерь помощью малых и дешевых регулирующих сопротивлений, так что число оборотов в пределах регулирования почти независимо от нагрузки; таким же образом энергии, требуемая для вращения якоря мотора и связанных с ним масс, может быть торможением сведена почти до нуля и, не считая потерь, вновь получена. Этот способ применяется часто при работе подъемных машин в рудниках, прокатных станах, бумажных машинах, кранах, лебедках и т. п. Фиг. 1676 изображает схему в соединении с переключателем, находящимся в магнитной цепи тока динамо управления для изменения направления вращения мотора. По вопросу вспомогательных схем для устранения влияния остаточного магнетизма и переменной потери напряжения в цепи якоря сравни электрические шахтные подъемники (в главе „точность соединения“, стр. 547).



Фиг. 1676.

В случае, если динамо управления приводится в движение посредством мотора, питаемого из сети, получается так называемая схема соединения по Леонарду.

С. Синхронные машины переменного тока.

Основные понятия: переменный и трехфазный ток—см. стр. 1195.

Определение потребной мощности—см. стр. 1198; синхронное число оборотов—см. стр. 1216.

Измерения при синхронных машинах—см. стр. 1360; коэффициент полезного действия—см. стр. 1243.

Обозначения на илеммах синхронных машин переменного тока приняты Союзом Германских Электротехников:

- Клеммы якоря при сопряженном соединении . . . *U, V, W,*
 " " " открытом " " " " . . . *U, V, W, X, Y, Z.*
 Средняя точка или средний провод . . . *0.*
 Обмотка магнитов (постоянный ток) . . . *J, K.*
 Линейный провод независимо от его полярности . . . *L.*
 Сеть трехфазная трехпроводная . . . *R, S, T.*
 " " " четырехпроводная . . . *R, S, T, O.*
 Магнитный регулятор (*s*—соединение со скользящим контактом) . . . *s-t.*

Контакт для выключения регулятора . . . *q.*

при чем *s* соединяется с *J* или *K*, *q*—с *K* или *J*, *t*—с источником постоянного тока.

Коэффициент полезного действия, вес и маховой момент (см. таблицу 7¹⁾). До 200 VA и 500 оборотов веса даны для генераторов с подшипниковыми цитами. Свыше веса даны для маховичных

¹⁾ По данным завода Сименс-Шукерт.

генераторов с 2 стоячими подшипниками и общей фундаментной плитой. Без плиты вес составляет от 66 до 76% общего веса. Машины старого типа имеют вес на 10 до 20% выше и маховой момент выше на 20 до 30%. Маховой момент больших машин в случае надобности может быть увеличен.

Таблица 7. Синхронные машины.

Число оборотов в минуту	Мощность kVA	Мощность kVA																
		5	10	50	80	100	200	350	500	1000	2000	3500						
1500	η	75—77	81—83	89—90	91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>G</i>	280	365	960	1270	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>GD²</i>	0,8	1,5	13	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	η	—	82	90	91	91,5	93	91	91,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>G</i>	—	390	1060	1450	1700	3950	5	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>GD²</i>	—	440	1200	1600	1850	2870	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
750	η	—	—	89	90,5	90,5	92	91,5	92	93	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>G</i>	—	—	1180	1570	1970	3130	6,9	8,7	13,5	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>GD²</i>	—	—	1300	1720	2070	3370	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
600	η	—	—	88,5	90	90	92	91,5	92	93	93,5	—	—	—	—	—	—	—
	<i>G</i>	—	—	—	—	—	2400	3600	6,6	8,3	14,6	23	—	—	—	—	—	—
	<i>GD²</i>	—	—	—	—	—	2630	3850	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	η	—	—	88,2	89,5	90	92	91	92	93	93,5	—	—	—	—	—	—	—
	<i>G</i>	—	—	—	—	—	—	4200	7,2	9,8	13,8	24	—	—	—	—	—	—
	<i>GD²</i>	—	—	—	—	—	—	4500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	η	—	—	—	—	—	87	89	91	92	93	93,5	94	—	—	—	—	—
	<i>G</i>	—	—	—	—	—	—	4,6	6,2	8,8	11	17	26	38	—	—	—	—
	<i>GD²</i>	—	—	—	—	—	—	1,1	2,1	4,2	7,0	15,7	40	92	—	—	—	—
180	η	—	—	—	—	—	—	—	88	90	91	92,5	93	94	—	—	—	—
	<i>G</i>	—	—	—	—	—	—	—	10,2	13	12,8	19	26	37,4	—	—	—	—
	<i>GD²</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

G — вес в kg или t, включая ременный шкив, с возбудителем и без последнего,

GD² — в kgm^2 и tm^2 ,

η указаны при $\cos \varphi = 0,8$.

Табличные данные могут быть приняты приближенно для синхронных моторов при указанных мощностях в kW на валу машины.

¹⁾ Без фундаментной плиты.

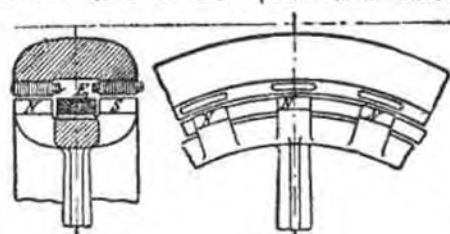
а) Конструкция синхронных машин переменного тока.

Статор несет обычно обмотку, в которой индуцируется электродвижительная сила, и служит таким образом якорем. Ротор несет возбуждательную магнитную обмотку, соединенную с контактным кольцами, к которым подводится ток неподвижными щетками.

Преимущество такого устройства состоит в том, что неподвижная обмотка якоря, особенно при высоком напряжении, может быть лучше изолирована и можно избежать сборных колец для отвода тока высокого напряжения. Ток для возбуждения получается или от машины постоянного тока, монтированной на одном валу с машиной (собственное возбуждение), или от сети (постороннее возбуждение). Ротор, т.-е. вращающаяся магнитная система, получает возбуждение от постоянного тока и обычно вращается внутри обмотки (внутренние полюсы), реже вращающееся магнитное поле охватывает неподвижную обмотку (наружные полюсы). В случае горизонтального вала последняя конструкция затруднительна, однако она иногда применяется ввиду того, что предоставляет возможность сосредоточить большие маховые массы в магнитном колесе (напр., для газомоторов).

Малые машины низкого напряжения строятся, как машины постоянного тока с неподвижными магнитами и вращающимся якорем. Для отвода тока служат при однофазном токе два, а при трехфазном три контактные кольца.

При машинах с рядом лежащими одноименными магнитными полюсами (фиг. 1677) магнитное колесо состоит из магнитного сердечника с двумя венцами выступов (полюсных башмаков), собранных из листового железа; в промежутке между последними находится неподвижная или вращающаяся вместе с магнитным маховиком



Фиг. 1677.

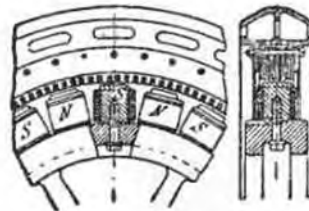
возбуждательная катушка E , охватывающая весь обод. Таким образом, на одной стороне колеса образуются только северные, а на другой только южные полюсы (фиг. 1677). Благодаря чередованию на вращающемся колесе полюсных башмаков и промежутков между ними железо якоря всегда намагничивается и почти размагничивается (но не перемагничивается) в одном и том же направлении, т.-е. железо якоря используется лишь на половину. Машины эти требуют много железа, обладают высоким рассеянием, тяжелы к дорожке. Ввиду простоты конструкции индукторов и малых потерь в железе машины с одноименными полюсами применяются в качестве генераторов тока средней и большой частоты (соответственно от 500 до 6000 и до 10 000 периодов в сек.).

Машины с чередующимися разноименными полюсами с неподвижным якорем являются в настоящее время наиболее

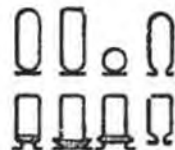
распространенным типом машины. Подход тока для возбуждения при помощи контактных колец не представляет затруднений. На фиг. 1678 представлена подобная машина с воздушными каналами в якоре в вертикальных стальных полюсах. Для возможности производить ремонт отдельных катушек либо вся обмотка может выдвигаться в бок, либо полюсы закрепляются на колесе так, чтобы их можно было выдвинуть в бок, так что катушки становятся доступными для ремонта.

Турбогенераторы — см. стр. 1249.

1. Якорь и обмотка якоря. Для уменьшения потерь при перемагничивании якорь собирается из штампованных, изолированных друг от друга железных листов. Для лучшего охлаждения якоря — для отвода тепла, выделенного вследствие потерь в железе, а также для отвода тепла, терпящегося в обмотках — служат при радиальной системе воздушного охлаждения каналы, расположенные в листовом железе радиально, шириной в 10 до 15 мм, высотой в 5—10 см; при осевой системе воздушного охлаждения якоря снабжается воздушными каналами для охлаждения, расположенными в осевом направлении. Для охлаждения мощных турбогенераторов часто применяется комбинированная система воздушных каналов — радиально-осевые каналы.



Фиг. 1678.



Фиг. 1679.

Обмотка якоря¹⁾ производится в пазах, расположенных по внутренней окружности обмотки. На фиг. 1679 приведены сечения пазов различной формы. При впаде замкнутом паза крайняя стенка паза у окружности (мостик паза) должна быть возможно тонкая (1 мм или менее). Замкнутые пазы применяются иногда для турбогенераторов, чтобы увеличить напряжение рассеяния якоря и ограничить таким образом ток короткого замыкания мгновенного действия (стр. 1256) в допустимых пределах (см. стр. 1356). Большой частью применяют полуоткрытые или совершенно открытые пазы, которые закрываются фибровыми или деревянными клипками. Изоляция паза при низком напряжении служит пресинпановые гильзы или трубки. При высоком напряжении применяются миканитовые трубки, через которые и протягиваются провода обмотки (обмотка протяжкой).

Открытые пазы имеют то преимущество, что катушки могут быть легко заменены. При открытых пазах, что особенно важно при высоком

¹⁾ Richter, Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen, Berlin, 1920. Изд. Ю. Шпрингер.

напряжения, шпунды могут быть изготовлены отдельно на заводе, где они проектируются коммандной массой и на специальных станках овресовываются механической бумагой в горячем состоянии и под давлением (шаблонная обмотка по системе Гейфлей).

Если на каждый паз приходится один или два витка, то обмотка может быть выполнена как стержневая: прямые стержни вместе с их изоляцией вставляются в пазы, соединяются между собой при помощи вилок и запаиваются. Машинны большой мощности изготавливаются со стержневой обмоткой даже для высокого напряжения.

Для уменьшения дополнительных потерь от блуждающих токов (см. стр. 1186 и 1196), обусловленных значительностью сечения меди, стержням придают форму сверла различного очертания¹⁾.

Провода, изолированные по системе Гейфлей для стержневой обмотки, могут быть применены также и при полустампанных пазах наруду с полустаблонными обмотками, которые открытой своей частью вставляются в пазы и затем пропаяются. Недостаток открытых пазов состоит в том, что добавочные потери, вследствие пульсаций в зубцах и утечек в каналах, в них велики.

Находящиеся внутри пазов части катушек называются боковыми сторонами, а выступающие из них части головками обмотки или лобовыми соединениями. По числу фаз различают одно-, двух- и трехфазную обмотки; по числу пазов на полюс и фазу обмотки бывают в два, три и более пазов на полюс и фазу. Обмотки различают также: по числу витков в пазу как при стержневой, так и при катушечной обмотке; по расположению в пространстве головок и лобовых соединений различают обмотки с головками в одной, двух или трех плоскостях. Последняя система большей частью имеет место, если обмотка раздельная. Далее различают обмотки с совершенно одинаковыми по форме и по длине шага лобовыми соединениями (фиг. 1683) и обмотки с неодинаковыми соединениями (фиг. 1682).

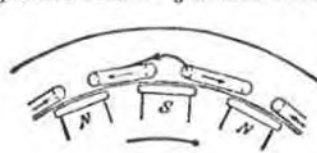
При катушечной обмотке, которая применяется по преимуществу при высоком напряжении, витки обмоток на каждый полюс (и т. е. пару полюсов) и фазу соединяются в секции или группы катушек. Наиболее простая форма якорной обмотки при однофазном токе представлена на фиг. 1680; на каждую сторону секции здесь приходится только по одному пазу. Лучше на каждый полюс и фазу иметь два, три и более пазов, так как при этом разность напряжения отдельных проводов в пазу друг относительно друга меньше и форма кривой ЭДС менее отклоняется от синусоидальной формы.

[„Соединительные“ проволоки для соединения отдельных секций здесь, как и в следующих чертежах, опущены и только для секций, расположенных у среднего полюса фиг. 1680, показаны соединительные проволоки].

На фиг. 1680 показана однофазная обмотка с двумя каналами на полюс, с так называемыми короткими катушками (средняя ширина катушки меньше расстояния между полюсами). Направление тока при показанном на чертеже расположении полюсов обозначено стрелками.

¹⁾ ETZ 1920 г. стр. 69. Electr. und Maschinenbau 1920 г. стр. 284, 1921 г., стр. 455. Archiv für Elektrotechnik 1916 г., стр. 30; 1919, стр. 203; 1925 г., стр. 128.

На фиг. 1681 показана трехфазная обмотка с колечными секциями. Для ясности изображена обмотка для одного паса на фазу и полюс, хотя на практике применяется два или три паса на полюс. На фиг. 168. секции одной фазы обозначены одинаковыми цифрами. Одна плоская катушка соединяется со следующей колечной через одну, как показывает нумерация. Ширина катушки равна полюсному шагу. Число полюсов для трехфазного тока $= \frac{2}{3}$ от числа секций.

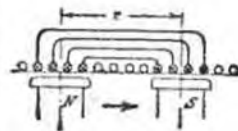


Фиг. 1680.

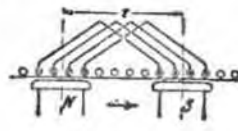


Фиг. 1681.

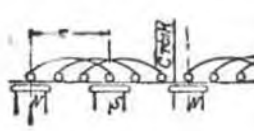
При нечетном числе пар полюсов (например, при 1000 об. в мин.) имеем двухколечную якорную секцию, которая с одной стороны секции соединяется с плоскими секциями, с другой — с колечными.



Фиг. 1682.



Фиг. 1683.



Фиг. 1684.

На фиг. 1682 и 1683 представлены, с электрической точки зрения, одинаковые однофазные четырехпазовые обмотки при 8 пазках на полюсном шаге τ , из которых четыре паса несут обмотку. Второй комплект в 4 паса предназначен для обмотки, сдвинутой к нейрой в пространстве на $\tau/2$ и в ней будет индуцироваться электродвигательная сила сдвинутая на 90° , т. е. имеем двухфазную 4-пазовую обмотку. Соединительные провода для последовательного соединения секций на чертеже не указаны.

При однофазных машинах обмотка занимает лишь $\frac{2}{3}$ пазов.

На фиг. 1684 показана однополюсная обмотка для трехфазного тока с длинными перекрестными секциями одинаковой длины, допускающая разрез якоря без необходимости произвести обмотку секции на месте соединения при монтаже. Конструкция согласно фиг. 1681, у которой головки секций расположены в двух плоскостях, наиболее употребительная.

В отношении формы и величины ЭДС и якорного поля обмотки, выполненные по фиг. 1681 и 1684, равноценны. В синхронных машинах трехфазного тока все три фазы большей частью соединяются в звезду.

При больших машинах с большой окружной скоростью в особенности при турбогенераторах (стр. 1219) лобовые соединения или головки обмоток должны быть в состоянии противостоять большому механическому усилию при коротком замыкании, т. е. должны быть прочно закреплены (фиг. 1685 и 1686).

Стенка пьользования якоря определяется числом C мощности в выражении $N = C (D:100)^2 \cdot l \cdot (\pi:100)$, где D — диаметр отверстия якоря в см, l — длина железной части якоря на шпитем воздушных прослоек в см, π — число оборотов в минуту, N — мощность машины в kVA для генераторов и в kW для моторов. Величина C зависит от D и находится:

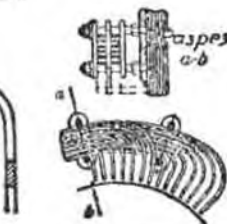
при диаметрах — 50, 100, 150, 250 и 500 см,
в пределах между — 1,5 1,9 2,1 2,3 и 2,5.

При большом полюсном шаге и большой длине якоря, при ненормальных конструкциях в очень высоком напряжении величина C может изменяться в больших пределах. При турбогенераторах значение C бывает значительно выше; при однофазных синхронных машинах значение C процентов на 30 ниже.

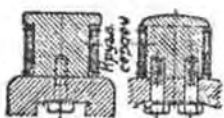
2. Ротор и магнитное поле. Различают машины с выступающими полюсами и со стержневыми цилиндрическими барабанами с разделенной воздушной обмоткой. Последний тип является нормальным для турбогенераторов. У тихоходных машин магнитное колесо имеет большей частью форму махового колеса (генераторы, приводимые в действие от газовых двигателей). Полюса изготовляются из литой стали или кованые, иногда собранные из железных листов (фиг. 1687). Полюсные башмаки составляют часто одно целое и прививаются или прикрепляются к ободу болтами (фиг. 1688), или в ласточкин хвост. Для уменьшения потерь в железе часто полюсные башмаки собираются из листового железа; башмаки скрепляются с полюсами в ласточкин хвост. В полюсных башмаках часто монтируются стержни демидовой обмотки, которые между собой соединяются кольцами (смотри стр. 1255 и 1265). Обмотка возбудителя часто из чистой и вставленной на ребро меди, которая изолируется бумагой или пресшпаном (Blankrotwicklung); фиг. 1678 и 1688.



Фиг. 1687.



Фиг. 1688.



Фиг. 1688.

Употребительное число оборотов (смотри стр. 1216 и 1243). Числом оборотов и диаметром ротора определяют его окружную скорость. При 50 периодах в секунду окружная скорость в м/сек равна полюсному шагу в сантиметрах.

Окружную скорость принимают до 35 м/сек. При больших генераторах (генераторах, приводимых в действие от водяных турбин) и при быстроходных генераторах окружную скорость допускают до 60 и более м/сек. Генераторы водяных турбин должны быть рассчитаны на воз-

можное увеличение скорости до 1,8 нормальной. Конструкция магнитного поля зависит от действующих центробежных усилий.

Для турбогенераторов, в виду допускаемых высоких окружных скоростей (до 140 м/сек), применяются специальные конструкции (смотри стр. 1251).

Охлаждение и вентиляция (смотри стр. 1252).

Роторы больших генераторов снабжаются вентиляторными крыльями, которые прогоняют воздух для охлаждения статора и ротора. Такие генераторы выполняются полу- или совершенно закрытого типа; в последнем случае они снабжаются, как и турбогенераторы, фильтрами, которые очищают охлаждающий воздух от пыли (смотри стр. 1253).

в) Турбогенераторы.

Турбогенераторы являются важнейшими электрическими машинами современных силовых установок. В виду того, что при турбогенераторах применяются чрезвычайно мощные единицы, эти машины должны быть чрезвычайно надежными. Благодаря тщательной работе и применению высококачественных материалов турбогенераторы могут работать около 20 лет, если они не подвергались чрезвычайными перегрузкам, или если изоляция не была повреждена от перенапряжения.

Наивысшая мощность турбогенераторов определяется исключительно экономическими соображениями.

Имеются установки с турбогенераторами следующих мощностей:

60 000 kVA при $n = 1000$ оборотов в минуту
40 000 kVA при $n = 1500$ " " "
35 000 kVA при $n = 3000$ " " "

При больших генераторах, в соответствии с разделением всей мощности турбины на отдельные части, мощность генератора также распределяется между двумя единицами: один генератор для ступеней высокого и среднего давления и один для части низкого давления.

Турбогенераторы должны быть рассчитаны так, чтобы они могли противостоять короткому замыканию (смотри стр. 1247 и 1356). При коротком замыкании на одной фазе должно происходить немедленное выключение машины. Однофазная нагрузка не должна быть более 20% всей

Таблица 8. Коэффициент полезного действия турбогенераторов.

(ДЕГ) при $\cos \varphi = 0,8$.

Номинальная мощность kVA	Коэффициент полезного действия при		Потребная для возбуждения мощность kW
	полной нагрузке	$\frac{1}{4}$ нагрузки	
1 000	82,1	—	10
3 000	83,8	—	22
5 000	84,0	—	26
10 000	84,1	83,9	45
15 000	84,7	84,9	66
20 000	85,2	85,3	86
25 000	85,5	85,3	105
30 000	85,5	85,4	123
40 000	85,7	85,6	160

мощности трехфазного генератора, так как демпферная обмотка нормальных машин недостаточна, чтобы компенсировать обратное поле (смотри стр. 1256).

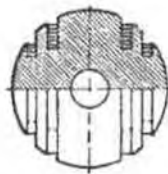
Дифференциальная защита предохраняет генератор таким путем, что при повреждении изоляции она под влиянием тока перегрузки в поврежденном месте приводит в действие соответствующее реле. В случае воспламенения статорной обмотки тушение таковой должно по возможности производиться автоматически свежим паром или углекислотой, которые под давлением вдуваются в момент воспламенения вместе с охлаждающим воздухом.

1. Конструкция якоря. Осевая длина якоря турбогенератора обычно весьма значительна. Якорь снабжается большим количеством радиальных или осевых воздушных каналов, через которые прогоняется охлаждающий воздух; при малых генераторах воздух проходит с одного конца якоря в другой; при генераторах большей мощности охлаждающий воздух подводится с обоих концов генератора под давлением к среднему широкому радиальному охлаждающему каналу. Для генераторов большой мощности осевая и радиальная система охлаждающих каналов комбинируются вместе. Обмотка выполняется обычно более, чем в 3 паза на полюс и фазу, благодаря чему кривая ЭДС имеет синусоидальную форму. Так как при коротком замыкании возникают токи, достигающие значительной величины, в 15 до 20 раз превышающей нормальную (по германским правилам для электромашин допускается 15-кратная) и так как, с другой стороны, головки обмоток (лобовые соединения) имеют значительную длину (80 до 120) см, то они должны быть прочно укреплены для того, чтобы они могли противостоять механическим усилиям, вызываемым коротким замыканием; в отношении короткого замыкания современные генераторы (стр. 1247 и 1356) должны быть достаточно надежны.

Закрепления обмоток длинными в пазах должны, если это только возможно, ежегодно перебираться в виду усадки или сморщивания изоляции. Для уменьшения тока короткого замыкания можно перед генератором включить в цепь катушку самонадукции.

2. Конструкция ротора. Высокие окружные скорости (от 80 до 140 м/сек) создают большие затруднения с механической стороны. Ротор обычно изготавливается из цилиндра массивной тигельной стали, на котором выфрезеровываются каналы для обмотки поля (фиг. 1689, 1692). При генераторах значительной мощности и больших окружных скоростях ротор часто собирается из ряда листов толщиной в 4 до 8 см; в последнее время таким образом собирается ротор и при однофазных турбогенераторах, но при этом ротор снабжается прочной демпферной обмоткой из медных стержней, которые одновременно служат для замыкания пазов возбуждающей обмотки; эти стержни вместе с крышками для головок обмоток образуют род беличьего колеса, которое и амортизирует вращающееся в обратном направлении поле (смотри стр. 1258). При однофазных генераторах ротор часто набирается из штампованного листового железа. Таким же образом набирается и ротор малых трехфазных генераторов (фиг. 1690). При массивной конструкции ротора можно только один зубец набрать из штампованного железа и соединить их с соответствующим ротором: например, при помощи ласточкин хвоста

(фиг. 1691, AEG). Осевые и радиальные воздушные каналы выполняются или в зубцах, или между обмоткой и зубцами. При последней конструкции возбуждающие катушки могут быть намотаны вне ротора и просушены в печи. Роторные лапы для осевого охлаждения показаны на фиг. 1692 а и б для ротора сплошного типа и на фиг. 1693—для ротора собранного из листового железа. Хорошие результаты получаются при 22 пазах,



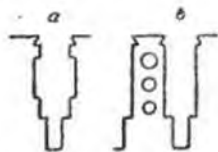
Фиг. 1689



Фиг. 1690



Фиг. 1691



Фиг. 1692



Фиг. 1693



Фиг. 1694



Фиг. 1695

из которых обмотка находится в 16 пазах, или при 26 пазах, из которых обмотано 20. Редко применяются выступающие полюса специальной конструкции (фиг. 1694 и фиг. 1695), обмотка которых должна быть предохранена от выпучивания. При конструкции согласно фиг. 1689—1693 головки секций должны быть защищены бандажами или бронзовыми крышками из марганцевой бронзы, дельта-металла или немагнитной никелевой стали. Ограниченность объема обмотки и необходимость защитить обмотку от действия центробежной силы делают затруднительным вентилирование нагретых возбуждающих обмоток, и необходимым являются особые вентиляторы и воздушные каналы. В виду высокого числа оборотов число полюсов невелико:

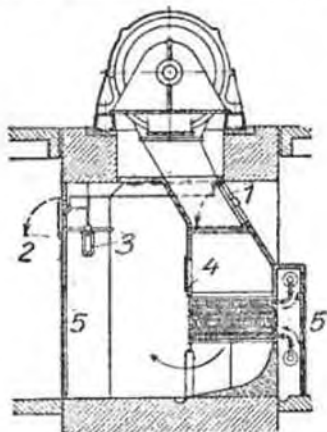
при $f = 50$,	число пар полюсов $p = 1$	2	3
		для $n = 3000$	1500 1000
при $f = 25$,	число пар полюсов $p = 1$	2	
		для $n = 1500$	750
при $f = 16\frac{2}{3}$,	число пар полюсов $p = 1$		
		для $n = 1000$.	

Обмотка возбуждения делается обычно из меди, поставленной на ребро, или из алюминия. Изоляция возможно тонкая в виду ограниченности обмоточного пространства, но вместе с тем возможно прочная и в виду больших напряжений, которым она подвергается под влиянием

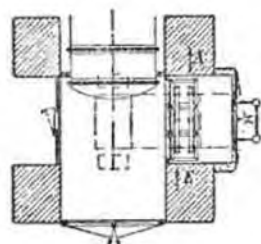
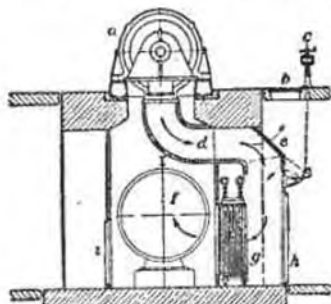
центробежной силы. Ротор должен быть статически и динамически хорошо сбалансирован¹⁾.

Возбуждение производится обычно особой возбуждательной машиной, непосредственно соединенной с генератором или монтированной на одном валу с ним. Нормальная мощность возбуждательной динамо-машины постоянного тока — от 0,5 до 1% мощности генератора.

3. Вентилирование и охлаждение. Количество воздуха, которое требуется для охлаждения генератора турбины, весьма значительно и составляет около 1 м³/сек на каждые 18—25 кВт потерь в генераторе энергии при нагреве воздуха на 20—25°. Охлаждающий воздух до вступления в генератор должен быть предварительно очищен от пыли пропускаемым через фильтр или при замкнутой системе охлажден циркули-



Фиг. 1696. 1—клапан для нагретого воздуха; 2—клапан для свежего воздуха; 3—нормальный магнит; 4—диз; 5—пылеотрапываемая заслонка.



Фиг. 1697. E—вход, A—выход холодной воды.

рующей водой, что особенно важно для пыльных помещений: например, в химической, угольной промышленности и на цементных заводах. Отходящий нагретый воздух при крупных агрегатах не должен выш-

¹⁾ Приспособления для такой балансировки смотри: Гейман, О динамической балансировки машинных частей, работающих с большой скоростью. Ueber die dynamische Auswuchtung von raschlaufenden Maschinenstellen, ETZ, 1919 г. стр. 234.

Горт. Новейшие машины для динамической-статической выбалансировки. Fort, Neue dynamisch-statische Wuchtmaschinen, ETZ, 1925, стр. 1073.

Пунга. Выбалансировка, пользуясь векториапаратом. Punga, Auswuchtverfahren unter Benutzung des Vectorapparates El. und Maschinenbau, Wien, 1925 г. стр. 425.

скается в машинное помещение, так как он содержит очень большое количество тепла. Теплый воздух может быть использован для целей отопления. Циркуляция воздуха внутри генератора увеличивает опасность для машины в пожарном отношении. Для уменьшения этой опасности для обмотки применяются изоляционные материалы трудно воспламеняющиеся; для этой же цели служат быстродействующие запорные клапаны во всасывающем канале. В последнее время применяют все чаще для охлаждения турбогенераторов замкнутые системы циркуляции воздуха (фиг. 1696, Delbag¹⁾ и фиг. 1697, GEA²⁾). Объем охлаждающего воздуха в такой системе остается постоянным, за исключением неизбежных потерь от неплотностей в циркуляционной цепи; воздух обычно прогоняется от 6 до 10 раз в минуту через генератор. Нагретый воздух охлаждается циркулирующей водой. Полученное водой тепло в некоторых случаях может принять участие в общем термодинамическом процессе установив³⁾. Нагретый воздух по S—образному каналу d (фиг. 1697) подводится к ребристому охладителю g, а охлажденный воздух из f всасывается вновь генератором a. При помощи маховичка с переключением двойного клапана e можно подавать e свежий воздух при порче или чистке охладителя. Нагретый воздух выходит через решетку b. В случае воспламенения (загорания обмотки) весьма действительным средством для тушения пожара служит добавление углекислоты в воздух, циркулирующий для охлаждения генератора.

При современных крупных агрегатах обязателен непрерывный контроль температуры обмотки якоря, который производится при помощи указателя температуры с отчетом на расстоянии, или путем измерения температуры отходящего нагретого воздуха.

Критическое число оборотов (смотри Т. I, стр. 432), а также Т. II (стр. 319 и след.).

с) Работа синхронных машин.

1. ЭДС синхронной машины. При совершенном сопряжении w соединенных последовательно витков, пересекаемых синусоидально изменяющимся по времени магнитным потоком, наводится электродвиговая сила (эффективное ее значение) $E = 4,44 f w \Phi_{\max} 10^{-8} V$ (уравнение для трансформаторов см. стр. 1196). Синусоидальная форма (по времени) электродвиговой силы в обмотке синхронной машины получается при перемещении с равномерной скоростью магнитных полей с синусоидальной характеристикой. При не вполне совершенном сопряжении витков (разделенная обмотка статора), или если кривая поля не вполне синусоидальной формы, ЭДС на фазу будет:

$$E = 4,44 f w k_f f_w \Phi 10^{-8} V.$$

Обмоточный коэффициент f_w учитывает то обстоятельство, что при разделенной обмотке со многими пазами на полюс и фазу не все витки обмотки пересекаются всеми силовыми линиями магнитного потока

¹⁾ Германское 0-но по построению воздушных фильтров: Deutsche Luftfilter Baugesellschaft.

²⁾ 0-но по установке обезвизирующих устройств: Gesellschaft für Enstanzungsanlagen.

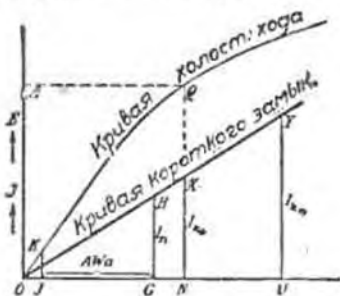
³⁾ Изв. Всесоюз. Ком. Электр., АЭГ.—Mitteilungen, 1920, стр. 326.

(фиг. 1682) и что существует некоторый сдвиг по фазе между ЭДС в отдельных катушках (фиг. 1683). В среднем в трехфазных машинах ¹⁾ коэффициент обмотки k_f равен 0,96.

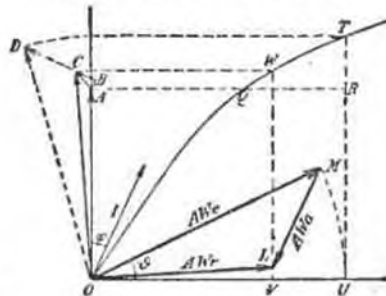
Фактор поля k_f (= площадь диаграммы поля: площадь основной волны) учитывает тот факт, что кривая поля обычно не чистая синусоида. При магнитном поле с одноименными полюсами фактор поля при наибольшем приближении кривой поля к синусоиде $k_f = 1,03$ до 1,05. Часто принимают $k = f_{\text{об}} k_f \pi : \sqrt{2}$.

$$\text{тогда } E = 2 k f_{\text{об}} \Phi 10^{-8} V; (4,44 = 2\pi : \sqrt{2}).$$

Возбуждение, необходимое для создания требуемого магнитного потока, определяется таким же образом, как в других машинах (смотри стр. 1191 и 1220). Графическое изображение величины магнитного потока, или пропорциональной ему ЭДС, в зависимости от тока возбуждения называется намагничивающей кривой (характеристика холостого хода) синхронной машины (фиг. 1698 и 1699). Напряжение у зажимов



Фиг. 1698.



Фиг. 1699.

машины при ее нагрузке при данном токе возбуждения ослабляется от следующих причин: омического сопротивления якорной обмотки (омическое падение напряжения), от напряжения индуцированного полем рассеяния (индуктивное падение напряжения), от ослабляющих поле ампер-витков якорной обмотки в особенности при индуктивной нагрузке, так как безызлучающая составляющая якорного тока прямо противоположна ампер-виткам возбуждения. Реакция якоря пропорциональна $\sin \varphi$ и при малом $\cos \varphi$ может быть весьма значительна (см. реакция якоря).

Если боковые стороны секции обм. сдвинуты в пространстве на 2π друг от друга, как у секций 1, 2 и 3 фиг. 1681, то наведенные в катушках электродвижительные силы будут смещены по времени на 120° —трехфазное напряжение (фиг. 1643). Все величины определяются в этом случае по напряжению одной фазы $E_{\text{ф.ф}}$. Напряжение у клемм Р машины при последовательном соединении фаз треугольником равно фазовому напряжению ($P = E_{\text{ф.ф}}$), при соединении звездой $P = E_{\text{ф.ф}} \cdot \sqrt{3}$.

¹⁾ В однофазных машинах он колеблется от 0,87 до 0,83 при $\frac{1}{2}$ обмотки и $g=1$ до ∞ .

2. Реакция якоря. Если трехфазный генератор отдает ток, то якорь создает магнитное поле, при чем если зазор между статором и ротором остается постоянным, например—при турбогенераторах с разделенной возбуждательной обмоткой, то поле якоря имеет синусоидальную форму; поле это вращается синхронно с главным полем возбуждения, т.-е. относительно остается к нему неподвижным и складывается с ним вместе в одно результирующее поле Φ , которое и индуцирует ЭДС машины. Фактически мы имеем таким образом только результирующее поле Φ ; поле же якоря и поле возбуждения являются фиктивными величинами.

Если рассмотрим только одну фазу, напр. фиг. 1682 (машина с одноименными полюсами), то в случае, если статорный ток находится в фазе с ЭДС и если не принять во внимание омического и индуктивного падения напряжения, т.-е. если ЭДС и ток одновременно принимают свои максимальные значения, фиктивное якорное поле будет смещено в пространстве на 90° ($\tau = 180^\circ$) по отношению к полю возбуждения; если магнитное колесо имеет постоянную угловую скорость, то такой же будет сдвиг и во времени. Если ток нагрузки сдвинут во времени на 90° по отношению к ЭДС, то вращающееся якорное поле имеет свое максимальное значение в пространстве в том же месте, как поле возбуждения, и результирующее поле совпадает в каждый момент по фазе с полем возбуждения. Если ток отстает на 90° от ЭДС (чисто индуктивная нагрузка), то якорное поле и поле магнитного возбуждения противодействуют друг другу. Если же ток опережает ЭДС на 90° (емкостная нагрузка), то якорное поле усиливает поле возбуждения. Фазовый сдвиг результирующего магнитного потока соответствует сдвигу тока. Если для простоты принять, что магнитная проницаемость между железного пространства синхронной машины всюду одинакова, то сложение магнитодвижущих сил для ампер-витков можно произвести по векторной диаграмме. На фиг. 1699 OM представляет ампер-витки возбуждения $AW_{\text{в}}$, LM —ампер-витки якоря $AW_{\text{я}}$ (равные приблизительно $2,5 g \tau I$, где g —число пазов на полюс и фазу, τ —число проводников в пазу, I —ток в каждом проводнике), которые находятся в фазе с током I , OL —результатирующее число ампер-витков AW (магнитодвижущая сила $AW_{\text{р}}$), которое создает результирующий магнитный поток Φ , индуцирующий ЭДС OC , которая необходима, чтобы преодолеть омическое падение напряжения в якоре AB и индуктивное падение напряжения в якорной обмотке BC и чтобы создать напряжение генератора OA ; $OU = OM$ представляет необходимое число ампер-витков $AW_{\text{в}}$ на полюсах возбуждения. Если диаграмма построена для полной нагрузки и $\cos \varphi = 0,8$, то KT представляет „изменение напряжения“, как это принято нормами для электрических машин (см. стр. 1358). Изменением напряжения оно называется потому, что при полном сбрасывании нагрузки, при полном возбуждении напряжение достигает величины, представленной отрезком UT , если линия OQT представляет характеристику холостого хода синхронной машины. Угол $MOU = \varphi$ показывает, на сколько электрических градусов ($2\tau = 360^\circ$) магнитное полюсное колесо сдвинуто по отношению к положению холостого хода. (Геометрический угол $\varphi' = \varphi : p$). За положение холостого хода принимается положение, в котором находится середина полюса ротора, когда электродвижительная сила имеет максимальное значение.

С некоторым приближением можно вышеуказанное сопоставление магнитных потоков принять при машинах с одноименными полюсами (выступающие полюса фиг. 1682), если силу поля, создаваемого якорем LM , уменьшить соответственно уменьшению проводимости междужелезного пространства в нейтральной зоне до $LM \approx 2,1 gZ$. При этом отклонения в размере углов и прочих величин сравнительно с другими способами изображения будут незначительны.

Арпгольд¹⁾ и другие авторы пользуются векторной диаграммой для выяснения зависимости как между фиктивными магнитодвижущими силами, так и индуцированными ими в якорной обмотке фиктивными напряжениями. На фиг. 1699 (машина со шлошным барабаном) CD обозначает фиктивное напряжение в якоре, которое вызывается фиктивным якорным полем ΛW_a ; BD —напряжение от реакции якоря, включая напряжение реакции поля рассеяния. При машинах с одноименными полюсами, ввиду переменной проводимости воздушного зазора, якорное поле разлагается на поперечное поле, которое вызывается рабочей слагаемой якорного тока, и противодействующее поле, вызываемое безымянной слагаемой якорного тока.

3. Короткое замыкание синхронных машин. Различают короткое замыкание длительного и внезапного, ударного характера. Ток длительного короткого замыкания является главным образом намагничивающим током и служит для намагничивания поля рассеяния короткого замыкания в якоре. Магнитный поток в якоре от тока его короткого замыкания действует непосредственно против магнитного потока от возбуждения. Величина тока короткого замыкания устанавливается так, что при определенном возбуждении, учитывая при этом противодействие якоря (чистое противодействие), в якорной обмотке индуцируется напряжение рассеяния, соответствующее результирующему числу витков, или результирующему полю тока короткого замыкания. Ток короткого замыкания, таким образом, не зависит от числа оборотов машины. Характеристика короткого замыкания, которая показывает зависимость тока длительного короткого замыкания от тока возбуждения, представляет прямую линию. Испытанием машины на короткое замыкание устанавливается ток возбуждения OG (фиг. 1698), при котором ток длительного короткого замыкания I_k равен номинальной силе тока $I_n = HG$ (стр. 1254). Из характеристики короткого замыкания определяется ток длительный короткого замыкания $J_{ko} = NX$ при возбуждении холостого хода ON и при возбуждении $IG = \Lambda W_a$ напряжение короткого замыкания при номинальной нагрузке $E_k = JK$ из диаграммы холостого хода. Отношение тока длительного короткого замыкания I_k к номинальной силе тока I_n называется отношением короткого замыкания синхронной машины $u_k = I_k : I_n$. Оно может быть отнесено к току длительного короткого замыкания при возбуждении холостого хода или при возбуждении при полной нагрузке. Обычно его относят к возбуждению холостого хода. Чем меньше отношение короткого замыкания u_k , тем значительное изменение напряжения синхронной машины (стр. 1255). Изменение напряже-

ния и отношение короткого замыкания могут быть взяты из вышеприведенной таблицы 9.

Согласно германских правил для электрических машин изменение напряжения при $\cos \varphi = 0,8$ не должно превосходить 50%.

Таблица 9. Изменение напряжений.

Генераторы трехфазн. тока	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	Отношение короткого замыкания
Быстрходные	8—15 %	18—31 %	2,0—1,4
Тихоходные	9—13 "	18—25 "	2,5—2,0
Турбогенераторы	16—25 "	30—48 "	1,2—0,7
Однофазные генераторы	17—20 %	35—40 %	1,2—0,5

При внезапном коротком замыкании (ударное короткое замыкание) ток короткого замыкания значительно выше тока длительного короткого замыкания, так как в этот момент весь магнитный поток Φ сопряжен с обмоткой якоря, в значительно более слабое результирующее магнитное поле, которое имеет место при длительном коротком замыкании, благодаря противодействию ампер-витков якоря, еще не успевшего образоваться в машине. В первый момент короткого замыкания ток в якоре должен достигнуть такой величины, чтобы образованное им напряжение рассеяния соответствовало бы полному магнитному потоку Φ или ЭДС в момент короткого замыкания. Ток ударного короткого замыкания затухает по закону показательной функции, пока не достигнет величины длительного короткого замыкания, что в зависимости от размеров машины продолжается от нескольких колебаний до нескольких секунд. В турбогенераторах старых типов ударный ток короткого замыкания достигает 25 до 30-кратного номинального. Согласно германских правил для электрических машин в новых машинах ударный ток короткого замыкания не должен превосходить 15-кратной величины нормальной. Это достигается тем, что рассеяние генератора соответственно увеличивается. Большие изменения напряжения новейших машин выравниваются быстродействующими регуляторами напряжения, напр. регулятором Тирилля, которыми и поддерживается постоянство напряжения у клемм.

4. Однофазные генераторы. Переменное поле, которое образуется при прохождении переменного тока через обмотку якоря, может быть разложено на синхронно вращающееся поле и поле обратного направления с половинной амплитудой.

В отношении вращающегося синхронного поля остаются в силе приведенные выше правила для полей трехфазного тока. Синхронное поле неподвижно по отношению к полю возбуждения. Обратное же вращающееся синхронное поле движется по отношению поля возбуждения с двойной скоростью синхронизма и индуцирует в возбуждательной обмотке при известных условиях переменный ток почти двойной частоты. Токи же двойной частоты в возбуждении индуцируют токи тройной частоты

¹⁾ Arpold, Wechselstromtechnik, 3 Aufl., IV Bd., Berlin, 1913 г.

в якорь. Такое увеличение частоты в 4 раза используется в машине Гольдшмидта для получения непосредственно токов высокой частоты для машин беспроводной связи. В обложечных же машинах переменного тока переменные поля с частотой, превышающей двойную основную величину, затухают почти полностью в массивных частях магнитной цепи в виде вихревых токов. Но и обратное поле с двойной периодичностью должно быть амортизировано особыми демферными обмотками в полюсных башмаках, чтобы уменьшить потери, а также устранить опасность пробоя возбуждающей обмотки от индуцированного высокого напряжения (стр. 1248).

При выступающих полюсах обратное поле может быть разложено на обратное поперечное поле и обратное противодействующее поле (см. стр. 1257). Последнее поле затухает уже в замкнутых обмотках возбуждения. Это затухание увеличивается специальными короткозамкнутым кольцом вокруг возбуждающего полюса, для какой цели могут быть использованы обмотки катушек возбуждения. Затухание обратного поперечного поля при выступающих полюсах может производиться стержнями в полюсных башмаках, замыкающими транслюционные зазоры. Чаще же применяются короткозамкнутые кольца, которые вместе со стержнями образуют род беличьего колеса, которым, таким образом, амортизируется также и обратное противодействие. При машинах же с магнитным полем сплошного барабанного типа, каковы, напр., однофазные турбогенераторы, такой метод для затухания поля применяется, как общее правило. Для этой цели клинья, которыми закрепляется обмотка в пазах, выполняются из меди и образуют с прижимными или лобовыми пластинами обмотку в виде беличьего колеса. Последние в виду вышеуказанного изготавливаются из хорошо проводящего материала (бронзы).

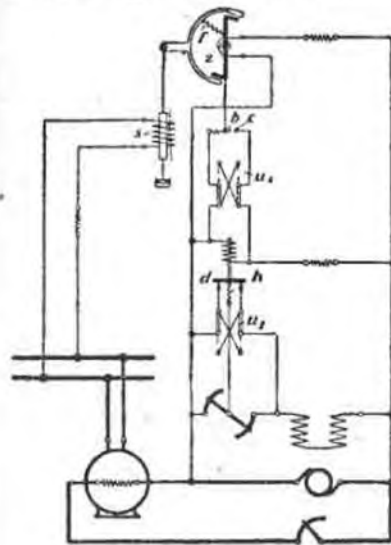
5. Регулирование напряжения генераторов переменного тока. Регулировка напряжения производится, как и в машинах постоянного тока (стр. 1231), изменением возбуждения генератора — вручную или автоматически. Автоматические регуляторы подразделяются на инерционные, ускоренно и быстро действующие.

В инерционно и ускореннодействующих регуляторах регулирующие сопротивления включаются и выключаются ступенями в зависимости от напряжения генератора. Это достигается, напр., перемещением в ту или другую сторону рычага, служащего для включения сопротивлений: напр., при помощи электромотора, который действует от реле, присоединенного к напряжению трехфазного тока. Для того, чтобы под влиянием магнитной инерции железных масс не происходило чрезмерного регулирования, в медленно действующих регуляторах необходимо, чтобы скорость включения и выключения была очень мала. Более совершенна работа ускореннодействующих регуляторов, у которых реле напряжения снабжено обратными контактами выравнивающими, благодаря чему достигается почти 5-кратная скорость регулировки; при этом не имеет места состояние чрезмерного регулирования. Ускореннодействующие регуляторы требуют весьма малого ухода, однако в отношении скорости регулирования они уступают быстродействующим регуляторам.

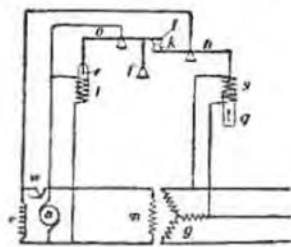
Быстродействующие регуляторы. Принцип действия регуляторов этого типа основан на том, что регулирующее сопротивление непрерывно

включено полностью и коротко замкнуто. Сопротивление так рассчитано, что при включенном сопротивлении напряжение генератора слишком мало, а при выключенном слишком велико в сравнении с нормальным напряжением. Магнитная инерция железных масс машины допускает установление и сохранение определенного напряжения генератора путем одного только регулирования продолжительности периода включения и выключения. Периодически короткое замыкаемое сопротивление находится в цепи возбуждения возбуждающей машины, чтобы произвести включение и выключение сравнительно малых количеств энергии. На фиг. 1701 показана принципиальная упрощенная схема регулятора Тиррилла завода АЕГ.

[Сопротивление w , находящееся в магнитной цепи возбуждающей машины a , может быть коротко замкнуто контактами k и l . Последние находятся под действием катушки s , через которую проходит ток, пропорциональный напряжению трехфазного тока, и катушки r — от напряжения возбуждающей машины. Если контакт k будет замкнут, то сред-



Фиг. 1700.



Фиг. 1701.

нее тяговое усилие r уравновешивается действием пружины f . Продолжительность периода открытия и закрытия контактов k и l устанавливается автоматически таким образом, чтобы среднее напряжение возбуждающей машины было постоянное. Если контакт k , при слишком высоком или слишком низком напряжении, по сравнению с нормальным напряжением, поднимается или соответственно опускается, то автоматически устанавливается меньшее или большее возбуждение. Реле напряжения s не должно при этом затрачивать никакого усилия, так как напряжение пружины повышается от t благодаря действию замкнутого контакта. Якорь q реле напряжения снабжен масляным катарактом, который устанавливается таким образом, чтобы при изменении нагрузки контакты k и l двигались с одинаковой скоростью. Масляный катаракт выбирается

соответственно магнитной инерция обмоток e и m и действует, как обратное или тормозное приспособление. В выполненных устройствах между контактами k и l и сопротивлением w вводится промежуточное реле, контакты которого рассчитаны на большее количество энергии.

Быстродействующий регулятор завода Сименс - Шукерт (фиг. 1700) отличается от регулятора Тирилла тем, что как реле напряжения z , так и реле z , так называемое дрожательное реле, присоединенное к клеммам якоря возбуждательной машины, действуют совместно на одну качающуюся систему. Якорь реле напряжения z поворачивает подвижную магнитную систему дрожательного реле z , возбужденная катушка которого неподвижна. Между якорем этой магнитной системы и последней находится пружина f . Дрожательное реле имеет подвижной контакт b и неподвижный c . Этими контактами замыкается промежуточное реле dh , которое находится в цепи с добавочным сопротивлением и присоединено к напряжению возбуждения; одновременно периодически коротко замыкается состояние из двух частей сопротивление возбуждения r . Переключателями u_1 и u_2 время от времени изменяется направление тока через контакты b , c , d и h , для получения более равномерного вноса.

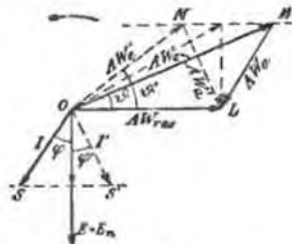
6. Параллельное включение и распределение нагрузки. Чтобы синхронная машина могла быть включена параллельно в сеть, должны быть выполнены нижеследующие условия: соединяемая параллельно с сетью машина и самая сеть должны иметь одинаковое напряжение и одинаковую частоту тока; они должны совпадать по фазе, должны иметь одинаковую последовательность фаз (при трехфазном токе), иметь по возможности одинаковые кривые напряжения (при различии этих кривых имеют место безваттные уравнивающие токи) и равномерный силовой момент (стр. 1264). Число оборотов ненагруженной машины должно быть отрегулировано в соответствии с периодичностью сети (стр. 1261). Для параллельного включения необходимы соответствующие измерительные приборы и приспособления, которые или позволяют установить, что вышеуказанные условия выполнены, или производят автоматическое параллельное включение. Наиболее простым приспособлением для параллельного включения служат фазовые лампы (или группы ламп). Совпадение по фазе узнается или по потуханию (фиг. 1796¹⁾, или по загоранию ламп (фиг. 1797¹⁾. Параллельное включение происходит без толчков, если оно производится, в зависимости от системы, в момент наибольшей или наименьшей яркости ламп. Вместо ламп можно пользоваться и вольтметрами. Одинаковая последовательность фаз при трехфазном токе может быть определена при помощи ламп накалывания, соединенных по фиг. 1798¹⁾; совпадение последовательности фаз вблизи синхронизма распознается потому, что все три лампы загораются и тухнут в одинаковом порядке. Вместо вышеуказанной простейшей формы часто применяют с равнотель фаз, который кроме равенства фаз указывает, вращается ли подключаемая машина быстрее или медленнее, нежели находящаяся в действии (сравнитель периодов). Прибор таким образом непосредственно указывает, в каком направлении должна быть изменена скорость подлежащей включению машины. Такие

¹⁾ Стр. 1342.

приборы могут состоять, напр., из группы накаливаемых ламп, которые соответственным образом включаются в цепь машин, подлежащих включению в параллель; в зависимости от того, вращается ли вновь включаемая машина слишком быстро или слишком медленно, лампы загораются в том или ином направлении. Вместо ламп применяются группы парных магнитов, которые включаются в цепь параллельно работающим машинам и заставляют стрелку вращаться в одном или другом направлении.

Вместо вышеуказанных сравнителей периодов рекомендуются двойные частотомеры, которые дают непосредственное показание частоты тока в машине, работающей на сеть, и подлежащей включению машины (пластинчатые указатели частоты системы Фрама, Гартмана-Брауна и др.). Приборы для автоматического параллельного включения машин изготавливаются зав. Сименс-Шукерт¹⁾, Броун-Боверн²⁾, Фойт и Гейффер³⁾.

Распределение нагрузки при генераторах переменного тока производится не как у динамомашины постоянного тока изменением возбуждения, а воздействием на регулятор первичного двигателя: например, устанавливая большую степень выполнения цилиндров, увеличивая крутящий момент, мы сообщаем тем самым магнитному полюсу некоторое опережение, т.е. угол δ фиг. 1699 увеличивается. Воздействие на регулятор первичного двигателя производится при помощи малого электромотора, который управляется от распределительного щита. Если не принять во внимание омического и индуктивного падения напряжения (т.е. если



фиг. 1702.

принять напряжение у щитков $= \mathcal{E}(\mathcal{C})$, мы будем иметь диаграмму фиг. 1702 (угол φ для случая, если генератор дает магнетизирующий ток в сеть — запаздывающий безваттный ток), согласно которой ток машины отстает от ЭДС (напряжение клеммовое) на угол φ . Электрическая мощность $EI \cos \varphi$ может отдаваться только в том случае, если угол δ отличается от нуля. При неизменяющейся нагрузке (мощности) и при постоянстве напряжения E_n и следовательно и при постоянстве AW_{re} и при переменном AW_0 , конец вектора AW_0 перемещается по прямой, параллельной OL , проходящей через точку M , а следовательно параллельной прямой, проходящей через векторы тока S . Уменьшением возбуждения при постоянстве нагрузки изменяется только величина даваемого генератором безваттного тока. При перевозбуждении генератор отдает в сеть намагничивающий ток, т.е. отнимает от сети размагничивающий ток; при недо-возбуждении намагничивающий ток получается из сети, т.е. посылает в сеть размагничивающие безваттные токи или, другими словами, и збыток намагничивающего тока отдается в сеть, недостаток его получается из сети (см. стр. 1267).

¹⁾ ETZ, 1921 г., стр. 1098. ²⁾ BBC—Mitt., 1923, стр. 20. ³⁾ ETZ, 1923, стр. 524

Если угол δ образуется не от крутящего момента (опережение), не от тормозного момента (отставание), то синхронная машина работает как синхронный мотор. Изменением возбуждения синхронного мотора получается такое же распределение безваттных токов, как и при синхронном генераторе (см. таблицу 10).

Таблица 10. Синхронные машины.

		Г е н е р а т о р		М о т о р	
		недо возбужден	пере возбужден	недо возбужден	пере возбужден
Отдаст в сеть	рабочий ток	соответственно отдаваемой электрической мощности		—	—
	безваттный ток	опережающий зарядный ток (емкостный ток)	отстающий индуктивный намагничивающий ток	опережающий зарядный ток (емкостный ток)	отстающий индуктивный намагничивающий ток
	отнесенные к	ЭДС и напряжению сети	ЭДС и напряжению сети	ЭДС	ЭДС
Потеря от сети	рабочий ток	—	—	соответственно механически отдаваемой мощности.	
	безваттный ток	отстающий намагничивающий ток (индуктивный)	опережающий зарядный ток (емкостный)	отстающий намагничивающий ток (индуктивный)	опережающий зарядный ток (емкостный)
	отнесенные к	ЭДС	ЭДС	напряжению сети	напряжению сети

7. Параллельная работа синхронных машин. Синхронная машина при параллельной работе с сетью или другой синхронной машиной должна быть с ними в синхронизме. Если магнитное колесо нагруженного синхронного генератора отстанет немного по какой-нибудь причине, то изменится угол δ (стр. 1255), и машина электрически разгружается; при постоянном же крутящем моменте машина механически получает ускорение; если же магнитное колесо по какой-либо причине получит ускорение, нагрузка генератора увеличивается, что вызывает замедление хода машины. Во всех случаях магнитное колесо возвращается в положение, соответствующее нагрузке, благодаря „синхронизирующему вращающему моменту“. В виду вышеуказанной причины при параллельной работе нескольких синхронных машин между собой или с сетью возникают синхронизирующие моменты, поддерживающие машины в синхронизме. Во всех случаях возвращение машины в положение, соответствующее ее нагрузке, происходит не аperiodически, т. е. полный синхронизм устанавливается не сразу или более или менее быстро, но вследствие инерции больших вращающихся масс генератор, получивший ускорение, перейдет

за положение синхронизма и обратно; подобная игра, постепенно затухающая, повторится несколько раз. Синхронизм будет достигнут после нескольких „качаний“. Амплитуда качаний уменьшится, т. е. происходит затухание качаний от действия механических причин (трение и сопротивление воздуха) и электрических (потери в железе в сплошных полюсных башмаках, потери в пазах в демпферных башмаках). Длительность колебания зависит от направляющих усилий (синхронизирующего момента) и маховой массы ротора (собственные колебания синхронной машины). Величину этих колебаний см. ниже. Во всяком случае для правильной и надежной параллельной работы должны быть приняты во внимание имеющие место в эксплуатации условия.

1. Параллельная работа синхронной машины с бесконечной сетью.

Напряжение и частота тока сети в этом случае остаются совершенно без изменения. Если угол отклонения магнитного колеса составляет $\Delta\delta$ (электрический угол, при двухполюсной машине угол в пространстве), то возникающий синхронизирующий момент можно принять пропорциональным углу $\Delta\delta$ и по Гергосу¹⁾ имеем: $M = (\rho^2 \cdot 2\pi f) \cdot N \cdot [(P : E_{so}) + tg\varphi] \cdot \Delta\delta$; в этой формуле: ρ —число пар полюсов, f —частота тока, P —напряжение у клемм в вольтах, φ —угол внешнего фазного сдвига, N —номинальная мощность в ваттах, E_{so} —общее индуктивное падение напряжения при номинальной мощности и $\cos\varphi=1$, т. е. включая „напряжения поля якоря“, соответствующее $\Delta W_{якоря}$ (фиг. 1699).

Продолжительность периода собственного качания (полное качание) в сек. составляет при синхронных машинах

$$T_0 = (2\pi \cdot p) \cdot \sqrt{2\pi f J : N[(P : E_{so}) + tg\varphi]},$$

где J —момент инерции вращающихся масс ротора в kgm^2 .

На практике дается обычно не момент инерции вращающихся частей маховика J , а раскатывающий момент $\alpha D^2 = 4 J \text{ kgm}^2$. Таким образом имеем:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sigma} \sqrt{\frac{2\pi f G D^2}{4N \left(\frac{P}{E_{so}} + tg\varphi\right)}} \quad \text{или} \quad T_0 = \frac{2,51}{p} \sqrt{\frac{\Gamma G D^2}{N \left(\frac{P}{E_{so}} + tg\varphi\right)}}$$

Число собственных колебаний в сек будет соответственно равно

$$z_0 = \frac{1}{T_0} = p \sqrt{\frac{N \left(\frac{P}{E_{so}} + tg\varphi\right)}{\Gamma G D^2}}$$

Собственное число колебаний не является таким образом величиной постоянной, но зависит от условий нагрузки ($\cos\varphi$). При изменении $\cos\varphi$ от 0,6 до 1,0 оно

Таблица 11.

$\cos\varphi$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
$tg\varphi$	0	0,48	0,75	1,02	1,37

¹⁾ ETZ—1900, стр. 188; 1903 г., стр. 561. Hilfsbuch f. Electrotechnik, 10 Aufl., Berlin, 1925, Jul. Springer.

увеличивается от 25 до 35%. Соответствующим распределением рабочего и безработного тока можно также изменить собственное число колебаний.

Если причины, вызывающие изменения угла δ , повторяются периодически (вынужденные колебания), напр., если прилагаемая двигательная сила неравномерна (поршневой двигатель), то может установиться резонанс между собственными колебаниями и получаемыми импульсами от первичного двигателя. Наступление резонанса может быть причиной выпадения машины из синхронизма или возникновения качаний, которые могут вызвать периодические выравнивающие токи значительной силы, делающие иногда невозможной правильную работу. Особое внимание надо обратить на импульсы, которые получают от первичного двигателя, а именно при одноцилиндровой паровой машине и одноцилиндровом двухтактном двигателе внутреннего сгорания через каждый оборот, при четырехтактном двигателе—через 2 оборота. При многоцилиндровой машине следует учитывать относительное расположение кривошипов для отдельных цилиндров, а также и разную степень наполнения с обеих сторон цилиндра. Индикаторные диаграммы машин, служащих для параллельной работы, не должны отличаться друг от друга при постоянстве нагрузки более, чем на 15% при всех нагрузках. При газовых машинах снятые последовательно друг за другом диаграммы не должны различаться между собой более, чем на 10% до $120^\circ/\omega$ далее, не должны иметь места пропуски во всплесках, особенно несколько пропусков, следующих друг за другом. Анализом диаграммы тангенциальных усилий в отношении гармоник (стр. 336) можно в каждом отдельном случае установить, имеются ли числа колебаний, которые представляют бы опасность, как близкие к собственным колебаниям, т. е. были бы настолько близки, что фактор увеличения ζ делается равным 1,1 до 1,05 (см. ниже) при действующем импульсе, достигающем двойного нормального окружного усилия, и $\zeta = 2,0$ —при весьма малом импульсе (паровые машины). Если собственное число колебаний Z_0 более или менее близко подходит к числу действующих импульсов на вичного двигателя, Z_d то происходит увеличение сдвига, т. е. увеличение степени неравномерности (стр. 333 и след.), численно выражающееся «фактором увеличения» (Розенберг, см. ниже) или «модулем резонанса» (Гергеса). Если не принять во внимание влугухание, то фактор увеличения $\zeta = \pm T_0^2 : (T_0^2 - T_z^2) = \pm z^2 : (z^2 - z_0^2)$, где T_0 —продолжительность собственных колебаний, T_z —продолжительность импульсов двигателя, z_0 —собственное число колебаний, z —число импульсов двигателя.

По возможности должно быть соблюдено условие $T_0 > T_z$. Диаграмма тангенциальных усилий должна быть подвергнута анализу в отношении основных колебаний и высших гармоник, в отношении их порядка и амплитуды ($T_{a1}, T_{a2}, T_{a3}, \dots$). Иногда останавливаются на T_{a2} , находящемся между T_{a1} и T_{a3} , чтобы обойтись меньшими маховыми массами, напр. при четырехтактном двигателе, но в таком случае должны быть приняты особые меры предосторожности.

Если требуемый GD^2 оказывается чрезмерно большим, то можно для параллельной работы машин с одинаковым числом оборотов выбрать и желательный GD^2 , если они будут включены при тактовом (кривошипном) синхронизме, т. е. так, чтобы диаграммы тангенциальных усилий

по времени покрывали друг друга. Параллельное включение в тактовый синхронизм представляет ряд неудобств (большое внимание при параллельном включении, сигналы, указывающие, что положения кривошипов совпадают), но вместе с тем такая система параллельной работы представляет большую экономию в маховых массах. Если в сети имеются синхронные моторы или однофазные умформеры, то такая система синхронизации представляет опасность в том отношении, что в них легко могут возникнуть малюткиобразные качания. При применении тормазов, действующих по принципу вихревых токов по Демару (регулируемый электромагнит, возбужденный постоянным током, которым вызываются вихревые токи в ободу маховика), достигается возможность включения в параллель при всяком положении кривошипа (полная длительная нагрузка может быть достигнута вихревыми токами). Затруднения, вызываемые при параллельной работе, могут быть уменьшены путем включения дроссельных катушек или трансформаторов (увеличение E_s), уменьшением воздушного зазора (u_k), включением GD^2 , установкой регулятора для горячего (регулятор см. далее).

Применение демпферных обмоток в полюсных башмаках обычно улучшает параллельную работу. Если при высокой степени неравномерности двигателя демпферы слишком сильны, то маховые массы теряют свои свойства аккумулятора, поглощающего энергию в период одного оборота и отдающего затем эту энергию, и происходят значительные колебания в расходе электроэнергии.

Другое представление дает Розенберг. В его расчет входит понятие: отношение реакций. Эта величина представляет отношение синхронизирующего усилия и первоначального усилия качания. Отношение реакций выражается следующим образом: $q = 710 k \eta p (T_0^2 \cdot n) \cdot (N_e \cdot GD^2)$, где N_e —нормальная отдаваемая генератором мощность в P. S. (полезная мощность в P. S.); T_0 —продолжительность одного импульса двигателя; k —отношение короткого замыкания равно частному от деления тока короткого замыкания при возбуждении холостого хода на нормальный ваттный ток (номинальный ток и номинальный коэффициент мощности); n —число оборотов в минуту; GD^2 —раскачивающий момент в kgm^2 ; η —коэффициент полезного действия генератора (в среднем 0,94); p —число пар полюсов.

Если N действительная мощность (отдаваемая мощность в kW), то $q = 963 k p \cdot (T_0^2 \cdot n) \cdot (N \cdot GD^2)$.

Коэффициент увеличения ζ (соответствует модулю резонанса Гергеса) указывает, во сколько раз взятые из диаграммы тангенциальных усилий импульсы увеличиваются благодаря возвратному действию машины переменного тока. Коэффициент увеличения $\zeta = 1 : (1 - q)$. Так как диаграмма тангенциальных усилий для одного оборота не может быть точно разделена на 2, 4 или 6 равных частей и она различна для прямого и обратного хода, отношение реакций необходимо исследовать не только для главного колебания, но и для налагающихся второстепенных высших колебаний, продолжительность которых равна половине, полному и двойному обороту, q должно быть меньше или значительно больше единицы (например, при синхронных моторах), так как при

$q = 1$ $\zeta = \infty$. Благодаря противодействию синхронной машины мы имеем:

при $q = 1:20$	$1:10$	$1:4$	$1:3$	$1:2$	1
$\zeta = 1,052$	$1,11$	$1,33$	$1,5$	2	∞

Критические значения наступают в случае, если при колебаниях, продолжительность которых равна двойному, целому, половинному обороту, q приближается к единице. В этом случае происходит приблизительный резонанс между собственными колебаниями синхронной машины и колебаниями двигателя (Гергес) или возникает чрезвычайно значительный коэффициент усиления (Розенберг). Вообще критический качающий момент на 1 PS: $GD_{крит}^2 : Ne = 710 k \eta p \cdot T_a^2 : n$. Для синхронной машины при $k = 3,75$, $\eta = 0,94$ и $f = 50$ имеем для резонанса при колебаниях продолжительностью в целый оборот:

в оборотах в минуту	300	250	214	188	166	150	125	107	94	83	75
р пар полюсов	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40
$(GD_{крит}^2 : Ne)$	4,33	6,92	12,9	21,6	37,5	53,2	111	206	344	508	852

Для резонанса при колебаниях продолжительностью $\frac{1}{2}$ оборота критиче-

ский момент составляет $\frac{1}{4}$ указанных чисел;

Для резонанса при колебаниях продолжительностью в 2 оборота (4-тактные) указанные числа увеличиваются в 4 раза.

Для других значений k указанные величины пропорционально пересчитываются.

Раскачивающий момент выполняют в 2 до 20 раз больше критического (т.е. q равно $\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{20}$). Необходимо, таким образом, руководствоваться не степенью неравномерности, но раскачивающим моментом GD^2 . Неравномерность, подсчитанная на основании условий работы двигателя (стр. 334), должна быть сильно изменена в соответствии с имеющими место колебаниями. Для одновальдровой паровой машины и быстрого одноцилиндрового четырехтактного газомотора допускают неравномерность, достигающую 1:150. Для двойных паровых машин и многоцилиндровых газомоторов особенно тихоходных, степень неравномерности принимается 1:300, 1:500 и более при $q = \frac{1}{2}$.

Колебания регулятора могут также повести к нарушению параллельной работы. Регуляторы двигателей должны быть не особенно чувствительны они должны обладать достаточной затухающей способностью, чтобы они не приходили в колебательное состояние вследствие неравномерности в течение отдельных оборотов или вследствие возвратного действия распределительных механизмов. Часто регуляторы снабжаются поэтому массивными тормозами, чтобы вызвать затухание этих колебаний. Регулятор должен при постепенном увеличении нагрузки от холо-

стого хода до полной нагрузки уменьшить плавно число оборотов от 4% до 6% в зависимости от того, будет ли первичный двигатель иметь равномерный крутящий момент (водяная или паровая турбина, поршневая машина, соединенная ремешной передачей с двигателем), или неравномерный (генераторы, непосредственно соединенные с поршневыми двигателями). Перестановка регулятора производится во время хода машины (см. стр. 1261), при чем регулятор должен позволить установить постоянную частоту тока при всякой нагрузке.

2) Параллельная работа двух синхронных машин (по Гергесу). Если $A = N \cdot [(P : E_s) + tg \phi]$, $B = 2n f J : p^2$, то числа колебаний отдельных машин при бесконечно мощной сети будут $\varepsilon_1 = (1:2\pi) \cdot \sqrt{A_1 : B_1}$ и $\varepsilon_2 = (1:2\pi) \cdot \sqrt{A_2 : B_2}$ и общее число собственных колебаний обеих машин при параллельной работе

$$\varepsilon_{12} = (1:2\pi) \cdot \sqrt{[(1:B_1) + (1:B_2)] : [(1:A_1) + (1:A_2)]}$$

3) Параллельная работа многих синхронных машин (Сарферт). Если параллельно работают n различных синхронных машин (генераторы, моторы, умформеры), то для этой системы имеем $(n-1)$ критических чисел колебаний. Если $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и ε_3 числа собственных колебаний отдельных машин, то критическое число колебаний Z_1 находится между ε_1 и ε_2 , Z_2 — между ε_2 и ε_3 и т. д. Если от какой-нибудь машины получается рабочий импульс с числом колебаний ε_a (от двигателя генератора или от машины, которая приводится в действие от электромотора, например: от поршневого насоса), совпадающим, например, с частотой Z_2 , то машины, обладающие собственным числом колебаний ε_2 и ε_3 , могут прийти в качание. Из вышеуказанного ясно, что при дальнейшем включении в хорошо работающую параллельно систему новой синхронной машины могут возникнуть затруднения и расстройство правильной параллельной работы (из этих же соображений умформеры и синхронные моторы снабжаются демпферными обмотками). Нужно поэтому, как указано выше (стр. 1264), контролировать параллельно систему в сети машина-генераторов, моторов и умформеров не исходя из импульсного колебания ε_a , близкого к собственным числам колебаний машин $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и т. д.

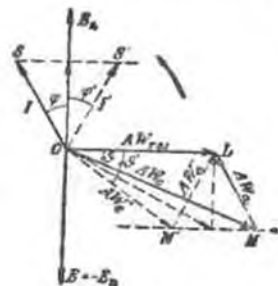
д) Синхронные моторы и регуляторы фаз.

Если затормозить синхронную машину (см. стр. 1262), включенную параллельно в сеть постоянного напряжения, то образуется угол отставания ϕ (фиг. 1703). Отдаваемая электрическая мощность $EI \cos \phi$, если не принимать в расчет потери электрической энергии, равна механической мощности, т.е. отдаваемая мощность пропорциональна тормозному моменту. Соответствующим возбуждением ΔW_e можно установить коэффициент мощности синхронного мотора равным единице, $\cos \phi = 1$. Увеличив возбуждение (ΔW_e) можно послать в сеть намагничивающий ток (отстающий безваттный ток). При недобуждении синхронный мотор получает намагничивающий ток из сети, как и синхронный гене-

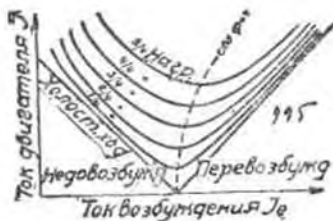
ратор при соответствующем возбуждении (см. стр. 1261). Если угол $\theta = 90^\circ$ то машина выдает из синхронизма.

Если будем наносить на диаграмме ток машины I при различных нагрузках в зависимости от тока возбуждения I_e , то получим V-образные кривые (фиг. 1704).

1. **Предельный момент.** Предельный момент синхронного мотора при нормальном возбуждении зависит от отношения короткого замыкания $u_k = I_k : I_n$, отнесенного к возбуждению холостого хода. Предельный момент/номинальный момент $\approx \sqrt{1 + u_k^2}$



Фиг. 1703.



Фиг. 1704.

2. **Пуск в ход синхронных моторов.** Синхронные моторы синхронизируются при пуске, как и синхронные генераторы. Для их пуска требуется пусковой мотор и приспособления для синхронизации (см. стр. 1342). В последнее время пуск синхронного мотора производится также при помощи демпферных обмоток, как мотора с короткозамкнутым якорем

в виде бегачьего колеса (см. стр. 1278) при пониженном напряжении ($\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{3}$ нормального). При включении возбуждения мотор сам входит в синхронизм (табл. 12). Устроив фазовую обмотку в увеличенных для этого полюсных башмаках, можно производить пуск синхронного мотора, как синхронного с резистором в цепи ротора. По достижении числа оборотов соответствующего нормальному скольжению фазовая обмотка ротора возбуждается постоянным током и мотор самостоятельно достигает синхронизма. Пределы мощности, пусковой момент и максимальный синхронный момент для машин завода Сименс-Шукерт могут быть взяты из таблицы 12.

3. **Изменение направления вращения синхронных моторов при трехфазном токе** производится изменением направления вращения якорного поля, т.е. переменны две фазы. Однофазные моторы могут быть синхронизированы в оба направления вращения.

4. **Синхронный мотор как регулятор сдвига фаз.** Возможность отдавать в сеть намагничивающий ток делает синхронные моторы регулятором сдвига фаз.

Таблица 12. Синхронные моторы.

Способ синхронизации	Синхронный мотор с демпфером в виде бегачьего колеса	Синхронный мотор с обмоткой для пуска	Синхронизация асинхронным мотором
Схема			
Сос ф при увелич. нагрузке в kW (различные пускательные линии относятся к различному возбуждению).			
Предельные мощности	2,5—20000 kW	20—700 kW	40—2000 kW
Напряжение	10000 V	10000 V	10000 V
Пусковой момент	30%	100—150%	180—200%
Синхронный максимальный момент	180%	170%	150%
Асинхронный максимальный момент	-	180—200%	200%

Синхронные моторы, работающие без нагрузки, применяются часто в качестве регуляторов сдвига фаз для самых значительных мощностей. Размеры намагничивающего тока для различных синхронных моторов, при их работе в качестве регуляторов сдвига фаз, даны в таблице 12 для различных величин нагрузки (безваттный ток, деленный на ток машины = $\sin \varphi$; ваттный ток, деленный на ток машины = $\cos \varphi$).

Д. Асинхронные машины переменного тока.

Асинхронные машины, в виде трехфазных асинхронных моторов (индукционные моторы), приобретают все большее значение. Причиной является простая конструкция их и, главным образом, все большее распространение районных станций, распределяющих электрическую энергию в форме трехфазного тока.

Асинхронные моторы возбуждаются подводимым к статору трехфазным током (вращающееся поле) и самостоятельно трогают с места, развивая при этом некоторый момент. Токи в роторе получают трансфор-

моторным действием статора. Однофазные индукционные моторы (стр. 1282) при трогании с места развивают только невращательный момент. Асинхронные моторы с короткозамкнутым ротором (моторы с беличьим колесом) являются наиболее простым и надежным двигателем. Область их применения ограничена величиной пускового тока (стр. 1274), каковая, в свою очередь, ограничена условиями присоединения к сети электрических станций. Кроме того, применение этих моторов ограничено еще тем, что пусковой момент их во многих случаях не имеет достаточной величины. Большие моторы потому имеют ротор с фазовой обмоткой, последовательно с каковой через контактные кольца при пуске присоединяются пусковые сопротивления для уменьшения пускового тока и одновременно увеличения пускового момента (стр. 1276).

Пояснение терминов. Переменный и трехфазный ток (стр. 1200) (НЕМ) (стр. 1352).

Измерения при асинхронных машинах (стр. 1365).

Нормальное обозначение клемм.

Сеть и статор (якорь), как в синхронных машинах, ротор (трехфазный) . . . и, в, w,

» (двухфазный) . . . и до x, y до v.

Такие же обозначения применяются и на клеммах соответствующих аппаратов для пуска.

Потери и коэффициент полезного действия (стр. 1365).

Коэффициенты полезного действия и коэффициенты мощности для небольших моторов могут быть взяты по таблице 13, для средних моторов — по DIN VDE 2650/2651 по таблице 14, для моторов водонепроницаемых — по DIN VDE 2652 по таблице 15.

Для работы мотора при неполной нагрузке коэффициент мощности может быть взят по таблице 16, коэффициент полезного действия — по таблице 17.

Таблица 13. Небольшие трехфазные моторы.

Число об./мин	Мощность kW	0,15	0,55	1,1	1,5	3,0	4,0
3000	η	— (69)	— (78)	— (80)	80 (81,5)	81,5 (84)	82 (84,5)
	cos φ	— (0,8)	— (0,94)	— (0,87)	0,85 (0,88)	0,86 (0,86)	0,86 (0,86)
1500	η	— (84)	74 (81)	76 (81,5)	79,5 (82,5)	82 (84,5)	83,5 (85,5)
	cos φ	— (0,73)	0,72 (0,77)	0,76 (0,82)	0,80 (0,83)	0,83 (0,86)	0,84 (0,87)
1000	η	—	70 (76)	75,5 (79,5)	77,5 (81)	81 (83,5)	82 (84,5)
	cos φ	—	0,66 (0,71)	0,71 (0,77)	0,74 (0,78)	0,78 (0,81)	0,80 (0,82)
750	η	—	—	—	77,5 (78,5)	79 (81,5)	—
	cos φ	—	—	—	0,69 (0,74)	0,75 (0,78)	—

Числа в скобках относятся к моторам с короткозамкнутым ротором. Номинальное напряжение: 125, 220 и 380 V (редко 500 V). Указаны синхронные числа оборотов (n_s).

Таблица 14. Трехфазные моторы средней мощности.

Число об./мин	Мощность kW	7,5	15	30	50	100	200	250
3000	η	83 (86)	85 (86,5)	88,5 (88,5)	89,5 (89,5)	90,5 (90,5)	92	92,5
	cos φ	0,87 (0,89)	0,89 (0,89)	0,90 (0,90)	0,91 (0,91)	0,91 (0,91)	0,92	0,92
1500	η	85 (87)	87,5 (87,5)	89 (89)	90 (90)	91 (91)	92,5	93
	cos φ	0,88 (0,87)	0,87 (0,87)	0,89 (0,89)	0,90 (0,90)	0,90 (0,90)	0,91	0,91
1000	η	84 (86)	86,5 (86,5)	89,5 (88,5)	90 (90)	91 (91)	92,5	93
	cos φ	0,83 (0,85)	0,85 (0,85)	0,87 (0,87)	0,88 (0,88)	0,89 (0,89)	0,90	0,90
750	η	83,5 (84)	86 (86)	88 (88)	89,5 (89,5)	91 (91)	92	92,5
	cos φ	0,81 (0,83)	0,84 (0,84)	0,86 (0,86)	0,87 (0,87)	0,88 (0,88)	0,89	0,89
600	η	83,5 (84)	85,5 (85,5)	87,5 (87,5)	89 (89)	90,5 (90,5)	91	92,5
	cos φ	0,79 (0,81)	0,81 (0,82)	0,83 (0,83)	0,85 (0,85)	0,86 (0,86)	0,88	0,88
500	η	—	85 (85)	87 (87)	88,5 (88,5)	90,5 (90,5)	92	92,5
	cos φ	—	0,78 (0,79)	0,81 (0,80)	0,83 (0,82)	0,85 (0,85)	0,86	0,87

Числа в скобках относятся к моторам с короткозамкнутым ротором. Указаны синхронные числа оборотов (n_s).

Максимальный вращающий момент: в 2—2,5 раза больше номинального вращающего момента. При числах оборотов от 70 до 500 об./мин и при мощностях меньших 15 kW в 1,6 до 2 раза больше номинального вращающего момента (номинальный вращающий момент в mkg равен номинальной мощности в ваттах, деленной на синхронное число оборотов; или точно $M_d = 0,973 N : n^1$).

Рабочее напряжение: 220 V от 0,125 до 160 kW, 380 V от 0,33 kW и выше, 500 V от 3 kW, 3000 V от 30 kW, 5000 V от 80 kW, 6000 V от 125 kW и выше.

Таблица 15. Нормализованные водонепроницаемые моторы.

$n_s = 1500$. Герметически закрытые от воды с ротором с контактными кольцами и присоединением для подъема щеток фирмы SSW.

Мощность kW	200	400	640	1000	1600
η	83	83,5	84	84,5	85
cos φ	0,86	0,87	0,87	0,88	0,88
S_c	2,05	3,62	5,0	8,15	11,3
G_1	0,52	0,16	1,27	2,36	3,3
GD^2	6,085	0,74	0,139	0,31	0,53
Q_1	3,75	1,4	2,0	2,4	3,2

Полный вес G_0 и вес ротора G_1 в т, маховый момент GD^2 в tm^2 , Q_1 количество воздуха для охлаждения в m^3/sec , скорость воздуха для охлаждения в подводящих и отводящих каналах от 4 до 5 м/сек. Номинальное напряжение: 3000, 5000 и 6000 V (до 400 kW также 380 и 500 V).

¹) n — действительное число оборотов.

Таблица 16. Коэффициент мощности.

Коэффициент мощности						Коэффициент мощности.					
при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки
0,74	0,87	0,90	0,91	0,91	0,90	0,50	0,70	0,80	0,83	0,84	0,81
0,72	0,85	0,89	0,90	0,90	0,89	0,49	0,69	0,78	0,82	0,83	0,83
0,67	0,82	0,87	0,89	0,89	0,88	0,48	0,68	0,77	0,81	0,82	0,82
0,63	0,80	0,86	0,88	0,88	0,87	0,47	0,67	0,76	0,80	0,81	0,81
0,60	0,78	0,85	0,87	0,87	0,86	0,46	0,65	0,75	0,79	0,80	0,80
0,58	0,77	0,84	0,86	0,87	0,86	0,44	0,63	0,73	0,78	0,80	0,80
0,56	0,74	0,82	0,85	0,86	0,86	0,43	0,62	0,72	0,77	0,79	0,79
0,54	0,72	0,81	0,84	0,85	0,85	0,40	0,60	0,70	0,76	0,78	0,78

Таблица 17. Коэффициент полезного действия.

Кое. фициент полезного действия						Коэффициент полезного действия					
при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{4}$ нагрузки	при $\frac{1}{2}$ нагрузки	при $\frac{3}{4}$ нагрузки
88	93,5	93,5	94	93,5	92,5	77	84,5	86	86	84,5	82
87	91,5	92,5	93	92,5	91,5	76	83,5	85	85	83,5	81
86	91	92	92	91,5	90	74,5	82,5	84	84	82,5	80
85	90	91	91	90	88,5	73	81,5	83	83	81,5	79
83	89	90	90	89	87	71,5	80,5	82	82	80	77
82	88	89	89	88	86	70,5	79,5	81	81	79	76
80	87	88	88	87	85	69	78,5	80	80	78	75
79	86	87	87	85,5	83	67	77	79	79	77	74

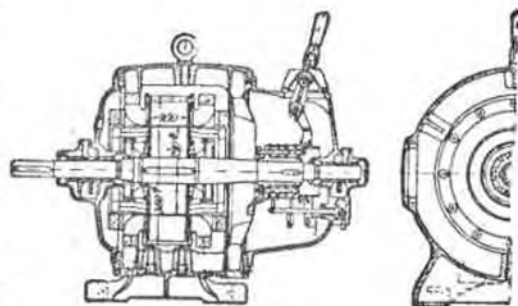
2) Конструкция асинхронных машин переменного тока.

1. Статор и обмотка статора. Статор (первичный якорь) собран так же, как и статор синхронной машины, из изолированных листов железа и для лучшего охлаждения делится воздушными каналами на отдельные пакеты (стр. 1245). Обмотка статора ¹⁾ соответствует впадине обмотки статора синхронной машины (стр. 1247).

Как правило, употребляются полужакрытые пазы, чтобы иметь возможно небольшой ток намагничивания, от которого в свою очередь зависит коэффициент мощности ($\cos \varphi$). В моторах высокого напряжения применяются открытые пазы для того, чтобы иметь возможность вложить обмотки асфальтированные (пропитанные компаундной массой), но при этом необходимо закрывать открытые пазы маг-

нитными клиньями (собранными из отдельных листов железа), часто так же употребляются обмотки подшаблонные (стр. 1245), которые возможно вложить в полужакрытые пазы. Для понижения тока намагничивания необходимо воздушный зазор между статором и ротором выполнить настолько малым, насколько только возможно по соображениям механической конструкции. При небольших моторах выполняют зазор меньше 1 мм. В моторах для тяжелых условий работы (для металлургических заводов, крановой работы и т. п.) выполняют воздушный зазор несколько большим. В больших

машинах необходимо иметь из-за одностороннего магнитного притяжения при сработавшихся впадинах особенно солидные валы и подшипники (применяются также роликовые подшипники) и прочие фундаментные плиты. В конструкции небольших моторов и моторов средней мощности преобладает тип с



Фиг. 1705.

цифовыми подшипниками, указанный на фиг. 1705. Мотор трехфазного тока фирмы SSW, закрытый, с вентиляцией, с контактными кольцами и прерывателем для подема щеток. Мощность 9 kW, $n = 1500$ об./мин.

2. Ротор и роторная обмотка. Ротор (вторичный якорь) выполняется из листов железа, собранных между двумя важными шайбами, подобно якорю машины постоянного тока, но только с закрытыми или полужакрытыми пазами (см. выше). Особенно проста конструкция короткозамкнутого ротора с круглыми или прямоугольными стержнями, неизолированными, замкнутыми напортом на обоих концах ротора при помощи бронзовых или медных колец большого сечения (обмотка „белые колесо“). Границы выполнения см. выше. Фазовая обмотка выполняется или катушечной при небольших машинах, или стержневой с двумя проводами в пазу при больших машинах, или даже с одним проводом в пазу при очень больших машинах. Стержневая обмотка может быть выполнена следующим образом:

Обходная обмотка с лобовыми соединениями большей частью в двух плоскостях (одно рядом с другим при одном проводе на паз). При n проводах на полюс в фазу обмотка каждой фазы и раз обходит якорь, или как

обмотка постоянного тока с лобовыми соединениями в двух плоскостях (одно под другим, см. фиг. 1653) подобно якорю постоянного тока. Для лучшего использования обмотку выполняют почти исключительно, как разрезную в 6 местах (или кратном 6) обмотку постоянного тока, части которой соединены таким образом, что в одном

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, 2 Aufl., III Band, Berlin, Jul. Springer.—Richter, Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen, Berlin, 1920, Jul. Springer.

изву токи имеют одинаковое направление. В двух половинах обмотки наводится напряжение, одинаковое по фазе; эти половины соединяются между собой или последовательно, или параллельно.

Концы обмоток обыкновенно присоединяются к контактным кольцам. При помощи контактных колец в щель ротора можно ввести сопротивление для пуска в ход. Для уменьшения изнашивания и потерь на трение контактные кольца выдвигаются большей частью с приспособлением для короткого замыкания и подъема щеток. Это приспособление обеспечивает правильную последовательность короткого замыкания и подъема (фиг. 1705).

Меру использования машины дает величина мощности C в уравнении $N = C (D : 100)^2 l (n : 100) \text{ kW}$,

где D — диаметр якоря в см, l — длина якоря без воздушных каналов в см, n — число оборотов в минуту, N — мощность мотора в kW.

Величина мощности C зависит от полюсного деления τ .

При полюсном делении $\tau = 10, 20, 30, 40, 50$ см.

C соответственно равно 1,2 1,8 2,2 2,4 2,8.

б) Способ действия асинхронных машин.

1. ЭДС в асинхронных машинах. В магнитной цепи асинхронной машины, представленной на фиг. 1706, получается так же, как и в цепи трансформатора, магнитный поток, величина которого определяется из формулы $E_{ph} = 4,44 f_{w1} \Phi 10^{-8} \text{ V}$ (пренебрегал омическим сопротивлением). В этой формуле f_{w1} — коэффициент обмотки (стр. 1253), E_{ph} — напряжение на фазу, w_1 — число витков статора на фазу.

При потоке, расположенном в пространстве по синусоиде (асинхронные моторы трехфазного тока), $\Phi = (2 : \pi) \mathfrak{Q}_{\text{max}} l \tau$, где $\mathfrak{Q}_{\text{max}}$ представляет максимальное значение индукций в воздухе. При больших насаждениях магнитной цепи получается отклонение от кривой синусоидального распределения поля и максимальное значение $\mathfrak{Q}_{\text{max}}$ получается меньшей величины, чем следовало бы при синусоиде. При неподвижном и разомкнутом роторе поток Φ (пренебрегая рассеянием) спелен с обмоткой ротора, имеющей w_2 — витков на фазу. Напряжение ротора при неподвижном роторе (пусковое напряжение) равно $E_{ph2} = 4,44 f_{w2} \Phi 10^{-8} \text{ V}$ и передаточное число равно $\dot{u} = f_{w1} w_1 : f_{w2} w_2 = w_1 : w_2$, если $f_{w1} = f_{w2}$, что приблизительно всегда имеет место.

2. Ток намагничивания и ток холостого хода. Ток намагничивания I_{μ} получается такой величины, что возникающие (намагничивающие) ампер-витки могут пропустить через магнитную цепь вышеуказанный магнитный поток, соответствующий напряжению $\#u$ клемм. Расчет лучше всего получается при $2/3 \tau^1$). Ток холостого хода

складывается геометрически из тока намагничивания (безвзвешенная слагающая тока холостого хода) и из тока потерь при холостом ходе (потери в железе и на трение) (ваттная слагающая тока холостого хода). Воздушный зазор по возможности мал.

3. Идеальный ток короткого замыкания. Если при неподвижном роторе ¹⁾ обмотка статора подключена к напряжению сети, то в статоре получается ток, который в состоянии вытеснить вышеуказанный нормальный поток Φ в цепь потока рассеяния. Этот ток короткого замыкания I_{ki} , если принять во внимание омическое сопротивление, представляет собой действительный ток короткого замыкания; не принимая же во внимание омического сопротивления, имеем идеальный ток короткого замыкания I_{ki} . Этот последний, таким образом, как и I_{μ} — исключительно ток намагничивания и отстает от напряжения (ЭДС), как и ток намагничивания на 90° (фиг. 1709).

4. Коэффициент рассеяния. Магнитный поток в статоре Φ_1 больше магнитного потока в воздушном зазоре, а именно $\Phi_1 = (1 + \tau_1) \cdot \Phi_i$; поток в воздушном зазоре больше Φ_i потока в роторе, $\Phi_2 = (1 + \tau_2) \cdot \Phi_i$. Коэффициенты рассеяния τ_1 и τ_2 невелики. Величина их зависит от размера воздушного зазора δ и от формы пазов (между собой коэффициенты τ_1 и τ_2 не всегда равны). Для общего коэффициента рассеяния действительно по Вейге и д'у равенство $\Phi_1 = (1 + \tau') \Phi_2$, где $\tau' = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2$. Пренебрегая малой величиной $\tau_1 \tau_2$ по сравнению с $\tau_1 + \tau_2$, имеем $\tau' = \tau_1 + \tau_2$. Примерно величину коэффициента рассеяния можно определить по уравнению $\tau' = C(\delta : \tau)$, где $C = 10 - 15$. Более точно коэффициент рассеяния определяется по току намагничивания I_{μ} и идеальному току короткого замыкания I_{ki}

$$\tau' = I_{\mu} : (I_{ki} - I_{\mu}).$$

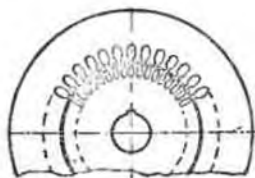
5. Вращающий момент и скольжение. Если бы ротор мотора, имеющего $2p$ полюсов, вращался синхронно с угловой скоростью $\omega_1 = 2\pi f_1 : p$ вращающегося поля, то в роторе не могли бы индуцироваться никакие токи и не мог бы возникнуть в вращающийся момент. Для получения токов в роторе необходимо поэтому относительное движение поля к ротору (асинхронизм). При небольшом сопротивлении короткозамкнутой обмотки ротора достаточно при полной нагрузке от 3 до 6% меньшей угловой скорости ротора $\omega_2 = 2\pi n : 60$, где n — число об./мин; эта разность скоростей называется скольжением s и часто выражается в процентах, $s = 100(\omega_1 - \omega_2) : \omega_1$, или $s = 100(f_1 - f_2) : f_1$, где $f_2 = pn : 60$ — число периодов вращения. Число оборотов при полной нагрузке, таким образом, только немногим отличается от числа оборотов при холостом ходе (шунтовой характер, стр. 1216).

Вращающий момент мотора трехфазного тока, практически действующий на валу его, равен приблизительно $M_d = N : n_s$, где N — номинальная мощность в ваттах и n_s — синхронное число оборотов, т. е. число оборотов статорного вращающегося поля.

Для понимания работы трехфазного мотора важно знать точное значение вращающего момента, включая момент трения: оно равно

$$M_d = 0,973 \cdot N : n = 0,973 \cdot N_s : n_s,$$

¹⁾ Обмотка ротора замкнута накоротко.



фиг. 1706.

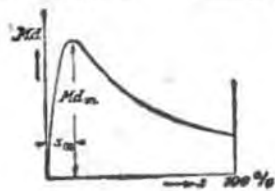
где n — действительное число оборотов, N_3 — мощность мотора в воздушном зазоре (см. ниже) в ваттах.

Вращающий момент не зависит от числа фаз m_2 в роторе. Число фаз ротора не обязательно должно быть равно числу фаз m_1 статора. Можно при двухфазных моторах ($m_1 = 2$) применять в роторе трехфазную обмотку ($m_2 = 3$) и наоборот.

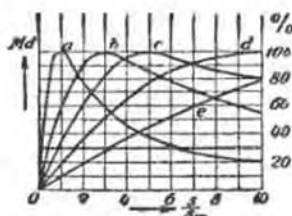
Скольжение s и вращающий момент M_d находится в известной существенной зависимости друг от друга. Скольжение s соответствует известное "число оборотов скольжения" $n_s - n$, где n_s — синхронное число оборотов. Число оборотов скольжения относится к синхронному числу оборотов, как потери в меди ротора V_{Cu} относятся ко всей переданной ротору мощности, т. е. мощности в воздушном зазоре; итак, $s = (n_s - n) : n_s = (\text{потери в меди ротора}) : \text{мощность в воздушном зазоре}$, или в процентах

$$s = \frac{100 \cdot 3 I_2^2 R_2}{9,81 \pi (n_s : 30) M_d}$$

если R_2 — сопротивление одной фазы обмотки ротора при трехфазной обмотке (мощность в воздушном зазоре = вся подводимая к мотору мощность — потери в статоре).



Фиг. 1707.



Фиг. 1708.

Вращающий момент при скольжении $s = 0$, или при 0%, равен 0. Величина момента возрастает с увеличением скольжения, достигает скоро максимальной величины и затем медленно убывает до момента при неподвижном роторе ($s = 1$ или 100%) (пусковой момент, фиг. 1707).

Из круговой диаграммы (стр. 1277) можно вывести, что $M_d : M_{dm} = 2 : [(s : s_m) + (s_m : s)]$ (фиг. 1708¹) кривая a , где M_{dm} — максимальный момент или перекидной момент, s_m — скольжение, соответствующее максимальному моменту при короткозамкнутой цепи ротора — "скольжение падения", при превышении которого обороты мотора падают (мотор останавливается) (Kloss, Archiv für Elektrotechnik, 1916, S. 59). Пусковой момент M_{da} ($s = 1$ или 100%) можно определить, если известно s_m . Например, если $s_m = 0,20$ или 20%, то M_{da} можно определить по кривой a для отношения $s : s_m = 5$.

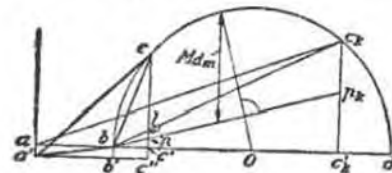
Если для пуска (стр. 1274) или для регулировки числа оборотов (стр. 1280) включают сопротивление в цепь ротора, то для определенного момента M_d справедливо равенство

$$s_w : s_o = (R_2 + R_w) : R_2$$

¹ M_d нанесено в процентах от M_{dmax} ; s — кратное от s_m .

где s_o — скольжение без сопротивления в цепи ротора, s_w — скольжение при сопротивлении в цепи ротора, R_2 — сопротивление ротора, R_w — включенное пусковое сопротивление. Таким образом получаются для различных отношений $R_w : R_2$ следующие кривые моментов (фиг. 1708) см. таблицу:

Кривая	$R_w : R_2$
a	0
b	2
c	4
d	9
e	19



Фиг. 1708.

6. Круговая диаграмма. Если известен из расчета, или по измерению, ток намагничивания I_μ и ток короткого замыкания I_k или I_{kb} то диаграмма Гейланда или упрощенная круговая диаграмма, согласно фиг. 1708, дают возможность наглядно разобраться в работе мотора и во взаимоотношении токов. Круговая диаграмма выводится из диаграммы трансформатора (стр. 1309), при чем асинхронный мотор представляет из себя род трансформатора со вторичной обмоткой, расположенной по окружности. Так же, как и в трансформаторе, токи при нагрузке уравновешиваются так, что первичные и вторичные ампер-витки AW дают в результате AW — намагничивания, необходимые для создания магнитного потока Φ (стр. 1308).

При расчете известные $I_\mu = a'b' = ab$ и $I_{kb} = ad$ откладываются на диаграмме в определенном масштабе токов (1 см = xA). Таким образом определяется круг по диаметру bd ; $I_k = ac_k$ определяется графически по углу φ_k' , который образует $I_k = ac_k$ с осью Y ; φ_k' определяется также по расчету из уравнения $\cos \varphi_k' = r_k : \sqrt{x_k^2 + r_k^2}$ где $x_k = E_{\mu h} : I_{kb}$ и $r_k = r_1 + r_{21}$, где r_{21} — соответствует приведенному в первичной цепи омическому сопротивлению $[(r_{21} = r_2 (w_1 : w_2)^2]$; $a'b'$ — ток холостого хода = I_o .

При измерении I_o измеряется непосредственно, а I_μ выводится, как безваттная слагающая I_o ; тоже и $I_k = ac_k$ и $\cos \varphi_k$ соответственно $a'c_k$ определяются при помощи измерения ваттметром (необходимо эстраполировать). Таким образом известен центр круга O и самый круг. Потери в железе = $c'e''$ необходимо определять при помощи разделения потерь холостого хода (стр. 1366).

В обоих случаях $a'e = I$ представляет, в определенном масштабе токов, номинальный ток с соответствующим ему углом сдвига фаз; $bc = I_2$ представляет собой ток ротора при $w_1 : w_2 = 1$.

По масштабу токов определяется масштаб мощности (1 см = $= 3 E_{\mu h} \cdot x \text{ Watt}$). При этом масштабе: $c_k p_k$ — потерям в меди ротора при коротком замыкании, $p_k c_k'$ — потерям в меди статора также при коротком замыкании, ce'' = подводимой мощности при номинальной

нагрузке, $c'c''$ — потерям в железе, cp — мощность, передаваемая через воздушный зазор, cl — мощность ротора (полезная отдаваемая мощность + потери на трение). Масштаб моментов для cp определяется из уравнения $M_d = 973 \times$ (мощность воздушного зазора : синхронное число оборотов). Таким образом получается максимальный вращающий момент M_{dm} по фиг. 1709 и пусковой вращающийся момент $c_k P_k$ при короткозамкнутом роторе. Небольшие имевшие здесь место отступления практически допустимы. Более точная диаграмма (Оссанна) сложнее и только при небольших моторах дает более точные результаты.

7. Пуск асинхронных моторов. При пуске больших моторов необходимо для уменьшения толчка тока при пуске и для увеличения пускового момента применять особые приспособления. Наиболее существенные виды пуска следующие:

Мотор с короткозамкнутым ротором. Включение мотора при помощи рубильника в цепи статора. При этом получается сильный толчок тока и, как следствие, значительные колебания напряжения сети при включении, а также сильный механический толчок мотора. Поэтому этот род пуска допустим только для небольших моторов или для моторов, которые пускаются в ход всегда вхолостую. Иногда моторы с короткозамкнутым ротором для того, чтобы уменьшить толчок тока при пуске (не поступаясь простотой устройства) и чтобы увеличить пусковой момент (см. выше, 6), выполняются со сравнительно большим сопротивлением R_2 вторичной цепи (цепи ротора). Это увеличение сопротивления ухудшает коэффициент полезного действия мотора.

Можно также достичь увеличения сопротивления в короткозамкнутых роторах при холостом ходе¹⁾ с помощью „оттеснения“ тока (стр. 1196) в массивных медных проводах, расположенных в узких, глубоких пазах. При пуске на них действует полная частота тока и поля рассеяния, и таким образом ток ротора в проводах „оттесняется“ наружу в радиальном направлении, что как бы уменьшает сечение провода. При работе же на провод действует только небольшая периодичность скольжения, при которой ток ротора распределяется равномерно по всему сечению меди.

Особые пусковые сопротивления. Для моторов с короткозамкнутыми якорями. Пусковое сопротивление включено в цепь тока неподвижной части (в большинстве случаев неперемно). Мотор пускается с пониженным напряжением и со слабым крутящим моментом, так как момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения. Подобное же действие достигается пусковыми трансформаторами, при помощи которых напряжение повышается ступенчатым (очень часто применяется для моторов любой величины, пускаемых в ход вхолостую или с незначительным крутящим моментом: например, для приведения во вращение центробежных насосов). При этом способе моторы могут быть пущены в работу без особых проводов и переключения падал, например — с центральной станции. Подобное же действие только при двух ступенях напряжения можно получить при трехфазном токе переключением статорной обмотки со „звезды“ на „треугольник“. Каждая

фаза получает тогда сперва напряжение $E: \sqrt{3}$, после же переключения к ней подводится напряжение E .

При переключении на „треугольник“ моторов нагруженных получается сильный толчок тока. Во избежание этого толчка тока применяются механические пусковые приспособления: например, центробежная муфта, пристроенная в ременном шкиве, которая соединяет вал ротора с ременным шкивом только по достижении мотором полного числа оборотов. Такие конструкции выполняются фирмами SSW¹⁾, AEG и др. Интересное решение вопроса представляет соединение под названием „Albo“-муфта²⁾, при котором включение муфты принудительно связано с моментом переключения на „треугольник“.

Для моторов с контактными кольцами пусковое сопротивление включено в цепь ротора. Получается большой пусковой момент, при чем возможно постепенное повышение его таким образом, что даже при полной нагрузке получается постепенный разгон мотора при незначительно увеличивающейся силе тока. Такое устройство с пусковым сопротивлением применяется наиболее часто. Число ступеней пускового сопротивления³⁾ и величину сопротивления можно определить для мотора трехфазного тока графически так же, как для моторов постоянного тока с шунтовой характеристикой (стр. 1235); I_{min} — ток, соответствующий максимальному крутящему моменту M_{dmax} при включении, I_{min} — ток, соответствующий моменту M_{d0} при каком возможно переключение на другую ступень, R_n — сопротивление ротора на фазу, R_1, R_2 и т. д. — суммарные сопротивления на фазу. Пусковые реостаты для моторов до 100 kW нормированы VDE в отношении числа ступеней и т. д. (REA). Число контактов реостата для двухфазных моторов может быть несколько меньшим, чем для трехфазных. Поэтому иногда небольшие моторы выполняются с двухфазным ротором.

Вспомогательные обмотки во вращающейся (вторичной) части моторов. Вращающаяся часть имеет две самостоятельные обмотки, а именно: одну обмотку, постоянно замкнутую со сравнительно высоким сопротивлением, и другую обмотку с незначительным сопротивлением, которая замыкается после пуска мотора в движение. Замыкание второй обмотки может выполняться автоматически при помощи центробежного замыкателя.

Ротор с противосоединением (система Гергеса). Вспомогательная обмотка включена при пуске противоположно главной обмотке, при достижении же мотором известного числа оборотов переключается последовательно с главной обмотки. Моторы до 10 kW пускаются примерно при $\frac{3}{4}$ нагрузки. Толчок тока и колебание напряжения только немногим превышают таковые при якоре с контактными кольцами. Во избежание толчка тока необходимо моторы большой мощности пускать в ход при уменьшенной нагрузке. Эта система применима до 80—100 kW при пуске в ход без нагрузки.

¹⁾ ETZ, 1924, S. 1064.

²⁾ Mitteilungen der Vereinigung d. E. W. 1925, S. 589.

³⁾ ETZ, 1894, S. 644.

¹⁾ Если мощность в этой форм. выражена в ваттах следует брать 0,973 вместо 973.

²⁾ ETZ, 1918, S. 483. El. und Maschinenb., Wien, 1926, S. 87.

8. Регулирование числа оборотов. Регулирование скольжения достигается при помощи включения сопротивления в цепь ротора (стр. 1276). Этот способ регулирования неизбежно влечет за собой потери. Величина потерь определяется соотношением: скольжение $s =$ — потерям в меди ротора, деленным на мощность воздушного зазора (стр. 1276). Такая регулировка применяется, например, при преобразователях Ильгнера для соединений по схеме Леонарда (стр. 1242). При регулировке оборотов при помощи скольжения мотор теряет характеристику шунтового мотора, так как число оборотов значительно варьирует от нагрузки.

Можно регулировать число оборотов без потери при помощи каскадных соединений, при чем энергия, поглощаемая при регулировании скольжением в сопротивлениях, механически используется „второй машиной“. Второй машиной может служить непосредственно соединенный мотор трехфазного тока, к обмотке статора которого подводится от контактных колец ток ротора „первичного мотора“. Возможен также подвод тока к роторной обмотке второй машины непосредственно от ротора первичного мотора без помощи контактных колец. В этом случае во второй машине обмотки ротора и статора как бы переставлены одна на место другой. При каскадном включении число оборотов агрегата соответствует числу оборотов мотора с числом полюсов, равным сумме числа полюсов обеих машин. Если применять два мотора с различными числами полюсов, то возможно получить четыре различные скорости, смотря потому, работают ли моторы в отдельности или же соединены в каскад.

Второй машиной может быть также однокорный преобразователь, дающий ток для мотора постоянного тока, непосредственно соединенного с первой машиной (каскадные схемы Кремера); затем, второй машиной может быть непосредственно соединенный коллекторный мотор трехфазного тока с регулирующим трансформатором.

С помощью переключения полюсов возможно менять число оборотов ступенями без потерь. Если ротор имеет фазовую обмотку, то переключение полюсов должно быть и в статоре, и в роторе. Поэтому лучше всего применять коротко-замкнутый ротор (белые колесо) одинаково работающий при разных числах полюсов. Для переключения полюсов применяются или две независимые друг от друга обмотки с равным числом полюсов, или же части обмотки выполняются так, что переключением получается другое число полюсов. Моторы с переключением полюсов имеют при всех оборотах шунтовые характеристики. Применяются они, между прочим, в моторах для электрических железных дорог трехфазного тока. Изменение направления вращения асинхронных моторов достигается переключением двух проводов подводящих ток, так как направление вращения вращающегося поля изменится от перемены двух фаз.

е) Улучшение коэффициента мощности в асинхронных машинах.

Работа нормальных асинхронных моторов всегда вызывает в сети сдвиг фаз. Коэффициент мощности этих моторов при полной нагрузке в редких

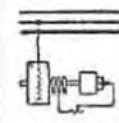
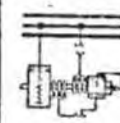
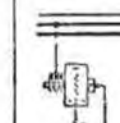
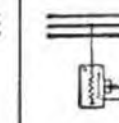

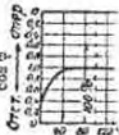
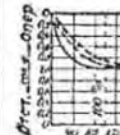
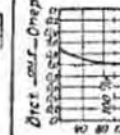

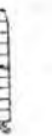
случаях принимает $\cos \varphi = 0,9$, при работе же вчтостую понижается часто до $0,2—0,3$ (таблица 13—16, стр. 1270). Поэтому в некоторых случаях выгоднее применить синхронные моторы (работающие при $\cos \varphi = 1$, стр. 1287), несмотря на то, что с применением синхронных моторов связаны известные недостатки (особое возбуждение постоянного тока, сложный пуск в ход, выключение из синхронизма при перегрузке). В больших асинхронных моторах сдвиг фаз может быть устранен при помощи особых возбуждателей трехфазного тока (компенсаторов), включаемых в сеть ротора. Эти компенсаторы представляют из себя ротор с коллектором, вращающийся или совсем без статора, или же в статоре без обмотки. К ротору компенсатора подводится трехфазный ток от колец ротора асинхронного двигателя (с непосредственно скольжения, самовозбуждающиеся возбуждители трехфазного тока). Величина поля, возникающего в компенсаторе и медленно вращающегося со скоростью, соответствующей периодичности скольжения, зависит от нагрузки мотора. Скорость этого поля в пространстве не зависит от числа оборотов ротора компенсатора с коллектором, приводимого в движение особым небольшим мотором. Если мотор, приводящий в движение ротор компенсатора, вращается со сверхсинхронной скоростью, то в обмотке компенсатора индуцируется трехфазное напряжение с частотой, равной частоте скольжения. Это напряжение опережает на 90° ток скольжения и величина его зависит как от величины вращающегося поля, т.-е., как указано выше, от нагрузки мотора, так и от величины сверхсинхронизма, т.-е. от числа оборотов ротора с коллектором. Этому опережающему напряжению соответствует опережающий ток, намагничивающий асинхронный мотор через ротор при частоте скольжения так, что этим „компенсируется“ намагничивание от сети с 50 периодами.

Подобное же действие получается при помощи „вibrатора Кавиана“. В вibrаторе Кавиана ток скольжения подводится к трем якорям постоянного тока, колеблющимся поэтому с частотой скольжения в поле постоянного тока. Таким образом в них индуцируется напряжение, опережающее ток на 90° . Благодаря компенсации сдвига фаз увеличивается и мощность, и максимальный момент мотора.

1. Измененные асинхронные моторы с возбуждателями трехфазного тока. Если применить конструкцию, при которой самовозбуждающийся возбуждатель трехфазного тока соединен непосредственно с валом главной машины, то нет необходимости в особом вращающемся моторе и, таким образом, все устройство может быть применено для моторов меньших мощностей. Компенсация сдвига фаз в этом случае зависит от нагрузки мотора (таблица 18, стр. 1283).

Чтобы иметь возможность компенсировать сдвиг фаз независимо от нагрузки мотора, применяются возбуждители трехфазного тока с постоянным возбуждением. Эти возбуждители состоят из ротора с коллектором, как указано выше, соединенного, кроме того, с помощью контактных колец и трансформатора с сетью. Эти возбуждители всегда должны быть жестко соединены с валом главного мотора, так как частота их должна совпадать с частотой скольжения (преобразователь частоты) (стр. 1348). Если, кроме того, в статоре трехфазного возбуждателя находится обмотка, через которую протекает ток скольжения, то мы имеем

Таблица 18. Компенсированные асинхронные моторы.

Асинхрон.	Асинхронный мотор с трехфазным возбужд.	Асинхронный мотор с трехфазным возбужд. посторон. возб.	Мотор Осеноса	Мотор Хейландта
				
				
40—1500 kW	100—10 000 kW	7,5—40 kW	1,5—5,5 kW	
10 000 V	10 000 V	500 V	500 V	
200%	200%	200%	150%	
250%	250%	250%	250%	

компенсированный возбудитель трехфазного тока с посторонним возбуждением фирмы SSW (стр. 1386).

Из таблицы 18 (стр. 1283) можно видеть пределы мощности, величину пускового и максимального моментов и величину перекачиваемого тока при различных нагрузках моторов в исполнении фирмы SSW (безваттный ток деленный на ток машины $= \sin \varphi$; ваттный ток, деленный на ток машины $= \cos \varphi$).

2. Компенсированные асинхронные моторы. Можно подвести в асинхронном моторе к ротору ток намагничивания с помощью коллектора, и тогда машина намагничивается через ротор при частоте скольжения, т.е. с незначительной безваттной мощностью. В этом случае на роторе должна быть особая, независимая от рабочей обмотки намагничивающая, соединенная с коллектором. Небольшое по величине напряжение, необходимое для этой обмотки, получается от вспомогательной обмотки статора (мотор Хейландта). Это устройство пригодно для коротко-замкнутых моторов. При моторах же большей мощности получают затруднения с коммутацией. Эти затруднения с коммутацией можно устранить, если подвести ток также к ротору (мотор Осеноса). В этом случае намагничивание происходит с частотой скольжения через статор при помощи неподвижного от коллектора тока намагничивания (стр. 1386). Границы мощности, $\cos \varphi$ и т. д. можно взять по таблице 18.

д) Однофазные индукционные моторы.

Однофазные моторы не имеют большого практического значения. Переменное поле статора можно рассматривать, как сумму двух в противоположные стороны вращающихся полей, каждое из которых равно половине максимальной величины переменного поля (стр. 1270). Каждое вращающееся поле сообщает ротору известный крутящий момент и направление вращения поля. Величина этого момента зависит от числа оборотов ротора, т.е. от скольжения (фиг. 1707). Когда ротор неподвижен, оба крутящие момента равны и направлены в противоположные стороны. Таким образом, суммарный крутящий момент равен нулю. Поэтому однофазные моторы не могут самостоятельно трогаться с места. Если же мотор, «развернуть» в том или другом направлении внешней силой, то момент, направленный противоположно вращению, уменьшается, момент же в направлении вращения (асинхронный) увеличивается. Получается результирующий момент, ускоряющий ротор.

Чтобы иметь возможность самостоятельно пустить в ход однофазный индукционный мотор, употребляют «вспомогательную» фазу. Вспомогательная фаза получается с помощью вспомогательной обмотки статора, сдвинутой в пространстве в отношении главной обмотки. Эту вспомогательную обмотку питают током, сдвинутым по фазе от главного тока (при помощи индукции или емкости). Таким образом, получается вращающееся поле, правда не совершенное, но достаточное, чтобы привести во вращение ротор хотя бы с небольшим пусковым моментом.

Трехфазный мотор, работающий, как однофазный, развивает, примерно, $\frac{2}{3}$ номинальной нагрузки. Обратное—трехфазный мотор, полностью нагруженный, при разрыве какой-либо фазы (например, если сто-

рез предохранитель) работает, как однофазный, но с перегрузкой в 50%. Эта перегрузка может в короткое время испортить мотор. Поэтому необходимо иметь специальные приспособления, которые бы совершенно выключали мотор при разрыве одной фазы.

е) Асинхронные генераторы.

Асинхронный мотор при синхронном вращении не развивает крутящего момента. Если же ротор асинхронного мотора с помощью внешней силы вращать со сверхсинхронной скоростью, то машина работает, как асинхронный генератор. Отдаваемая машина мощность зависит от скольжения (стр. 1276), отрицательного в данном случае. При работе генератором машина должна получать возбуждение

от сети, и такая работа возможна только при параллельной работе машины с сетью или с синхронной машиной. В этом случае синхронная машина должна давать необходимый безваттный ток, частота же соответствует числу оборотов синхронной машины. Подобного рода установки могут быть очень просты по конструкции в тех случаях, когда асинхронный генератор работает все время при полной нагрузке; синхронный же генератор покрывает только переменную часть нагрузки. Машина, приводящая в движение асинхронный генератор, в этом случае не нуждается в регуляторе, в если это водяная турбина, то не нуждается даже в пресмотре. Поэтому такие установки очень хороши для использования небольших водяных сил в соединении с существующей уже силовой станцией. Процесс синхронизирования, необходимый для пуска в ход синхронной машины, отпадает при пуске в ход асинхронного генератора. Асинхронный генератор просто включается в сеть и, при помощи регулирования отдаваемой нагрузки, доводится до необходимого числа оборотов (соответственно скольжению). Если асинхронный генератор выведен с короткозамкнутым ротором, то включение происходит с помощью дроссельных катушек, замыкаемых накоротко после пуска. Асинхронный генератор в соединении с возбудителем трехфазного тока можно использовать, как синхронный генератор и даже, как асинхронный конденсатор сдвига фаз¹⁾, в особенности же с компенсированным возбудителем постоянного возбуждения (компенсатор, стр. 1281).

Е. Коллекторные машины переменного тока.

Коллекторные машины переменного тока, в виде однофазных моторов для электрических железных дорог, получили большое значение. Это значение обусловлено возможностью питать их током высокого напряжения и регулировать число оборотов без потерь. Это последнее свойство дало возможность применять эти двигатели, как, например, репульсионные моторы и коллекторные моторы трехфазного тока, и ряде применений: для привода некоторых механических машин, поршневых насосов, печатных машин и подъемников. В некоторых случаях асинхронный мотор с выгодой можно заменить трехфазным коллекторным двигателем, особенно тогда, когда требуются большие пределы регулирования числа оборотов (без потерь) или же серьезная характеристика машины, т.е. большой пусковой момент.

Возможность такой замены зависит как от экономических соображений, так как коллекторный двигатель трехфазного тока естественно много дороже, чем асинхронный мотор, так и от практических соображений, так как в эксплуатации коллекторный мотор, в виду наличия коллектора, не так надежен, как асинхронный. Область применения коллекторных трехфазных моторов расширяется еще тем, что с помощью некоторых коллекторных моторов имеется возможность компенсировать сдвиг фаз.

Полезные термины: переменный и трехфазный ток (стр. 1195, 120), РКМ (стр. 1352).

Однообразное обозначение клемм VDE до сих пор еще не установлено. Клеммы временно обозначаются подобно соответствующим клеммам однофазных, трехфазных и постоянного тока машин.

Коэффициент полезного действия¹⁾ коллекторных моторов переменного тока.

Моторы небольшие	около 70%
„ средней мощности (от 15 kW и выше)	„ 80%
„ большой мощности	„ 83%
„ очень большой мощности (несколько сот kW)	„ 88%

Для определения коэффициента полезного действия моторов при работе с неполной нагрузкой следует умножить вышеназванные числа на коэффициенты таблицы 19.

Таблица 19.

Нагрузка	25	50	75	100	125%
Коэффициент	0,50	0,80	0,95	1,00	0,95

Напряжение. Коллекторные моторы переменного тока, в которых приключен к сети только статор, могут быть так же, как и асинхронные моторы, приключены к высокому напряжению (при соответствующей мощности моторов). Моторы, в которых ток подводится к ротору с помощью коллектора, могут быть выполнены только до напряжения в 500 В.

Таблица 20. Пределы регулирования, пусковой момент и пусковой ток в процентах номинальной величины.

Пределы регулирования	нормальные	достигаемые	Пусковой	
			Момент	Ток
Серьезный мотор однофазного тока	20—150%	0—150%	250%	200%
Репульсионный мотор	50—110 „	5—120 „	250 „	200 „
Компенсированный репульсионный мотор	20—130 „	0—150 „	250 „	200 „
Серьезный мотор трехфазного тока	50—130 „	5—130 „	250 „	200 „
Шунтовый мотор трехфазного тока	50—150 „	5—150 „	250 „	200 „

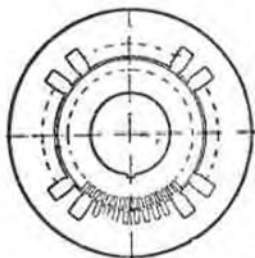
¹⁾ M. Schenkel, Die Kommutatormaschinen für einphasigen und mehrphasigen Wechselstrom, Berlin, 1924, W. de Gruyter & Co.

Таблица 21. Пуск в ход, регулирование числа оборотов и перемена направления вращения.

В нижеуказанных типах моторов применяются	Пуск в ход и регулирование с помощью	Перемена направления вращения с помощью
Сервисный мотор однофазного тока	Трансформаторов со ступенями напряжения в цепи статора	Переключения присоединяемой обмотки возбуждения
Регульционный мотор с подвижными щетками	Передвижения щеток	Передвижения щеток
Регульционный *) мотор с неподвижными щетками	Пускового сопротивления в цепи статора	Переключения обмотки статора
Компенсированный регульционный мотор	Трансформатора возбуждения в цепи ротора	Переключения соединений к трансформатору возбуждения
Сервисный мотор трехфазного тока	Передвижения щеток	Переключения двух соединений к статору и передвижения щеток
Шунтовой мотор трехфазного тока	Трансформатора со ступенями напряжения или передвижения обмотки статора, или используемой как автотрансформатор	Переключения двух соединений к статору
Шунтовой мотор с двойным комплектом щеток	Передвижения щеток	Переключения двух соединений к статору и передвижения щеток

а) Конструкция коллекторных моторов переменного тока.

Ротор и коллектор коллекторных моторов сконструированы так же, как якорь и коллектор машин постоянного тока, только ротор в большинстве случаев выполняется с полузакрытыми пазами. Полузакрытые пазы применяются для того, чтобы безаттравная мощность (ток намагничивания) была возможно мала. По этой же причине коллекторные моторы, так же, как и асинхронные, выполняются с возможно малым воздушным зазором. Обмотки роторов аналогичны обмоткам якорей машин постоянного тока. Статоры однофазных моторов собраны из изолированных листов железа. В больших моторах в статорах пазы равномерно распределены по окружности; в больших же моторах имеются в статоре или выраженные главные полюса с компенсационной обмоткой в пазах и, кроме того, вспомогательные полюса (фиг. 1710).



Фиг. 1710.

Статоры коллекторных моторов трехфазного тока подобны статорам асинхронных машин трехфазного тока. Обмотка статора

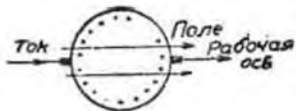
однофазных моторов в тех случаях, когда пазы распределены по окружности статора равномерно, подобна обмотке моторов трехфазного тока;

*) Выполняется, как регульско-асинхронный мотор для подмагничивания пускателя в ход, как регульско-синхронный мотор с большим крутящим моментом. После пуска обмотка якоря замыкается выкороткой центрального выключателя и мотор работает, как нормальный асинхронный.

при выраженных полюсах обмотка статора подобна таковой моторов постоянного тока с компенсационной обмоткой. Обмотки статоров трехфазных коллекторных моторов аналогичны обмоткам трехфазных асинхронных моторов, но снабжаются иногда добавочными отводами (стр. 1303).

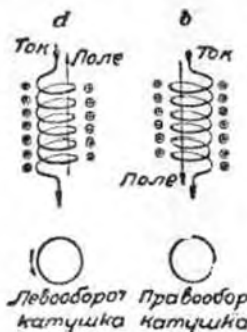
б) Действие однофазных коллекторных моторов.

1. Сервисный мотор. Если к якорю машины постоянного тока подвести переменное напряжение, то током, протекающим через якорь, создается переменное поле. Направление этого поля лежит в направлении осей щеток, независимо от того, вращается ли якорь или нет.



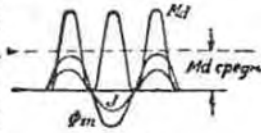
Фиг. 1711.

Благодаря коллектору картина токов и, как следствие, якорное поле остается неподвижной в пространстве (рабочая ось). Предположим, что обмотка секций якоря и катушек статора выполнена так, что в двухполюсной схеме направление тока и направление поля совпадают (фиг. 1711), т.е. что обмотки намагничиваются, как катушки с прямым ходом (фиг. 1712 б).



Фиг. 1712 а-б.

Поле, находящееся в фазе (по времени) с током якоря I , но сдвинутое в пространстве на известный угол в отношении осей щеток — поле Φ_m , возникшее от действия сервисной обмотки (вращающее поле или поле возбуждения), образует вместе с током якоря крутящий момент, достигающий максимальной величины, когда поле якоря и поле возбуждения взаимно перпендикулярны. Максимальный момент всегда положителен, но величина пропорционален



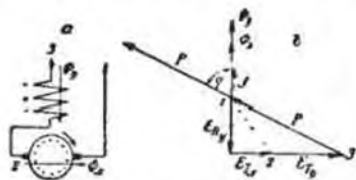
Фиг. 1713.

$\Phi_m I \cdot \sqrt{2}$ и пульсирует с числом пульсаций, равным двойной периодичности напряжения. Максимальное значение момента в два раза больше средней величины его (фиг. 1713). На это необходимо обращать внимание (с механической точки зрения) при выборе инверсии мотора для целей тяги! Величину крутящего момента и число оборотов возможно экономично (без значительных потерь) регулировать в широких пределах изменением напряжения с помощью трансформатора. Число оборотов мотора увеличивается с уменьшением крутящего момента, т.е. мотор обладает характеристикой сервисного мотора и особенно приспособлен для целей тяги в для кранов. Поле возбуждения Φ_y (фиг. 1714 а) индуцирует в обмотке возбуждения, поле же якоря Φ_a — в обмотке якоря

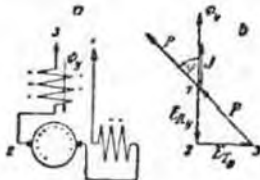
соответственно напряжения E_{T_x} и E_{T_y} , которые так понижают коэффициент мощности, что это простое последовательное соединение неприменимо на практике. Кроме того, в обмотка якоря, благодаря вращению якоря в поле возбуждения, возникает еще одно напряжение. Это напряжение E_{R_y} находится в фазе (по времени) с полем возбуждения Φ_y . Если пренебречь омическим сопротивлением и напряжением рассеяния в отдельных обмотках, то влечем векторную диаграмму (фиг. 1714 б), приняв во внимание, что Φ_x и Φ_y находятся в фазе (по времени) с током.

[Напряжения, указанные на диаграмме, могут быть измерены между точками, обозначенными числами. P означает напряжение у клемм, E_R — напряжение вращения, E_T — напряжение трансформации].

Для уничтожения поля якоря Φ_x и тем самым напряжения E_{T_x} возможно воспользоваться компенсационной обмоткой, соединенной или последовательно с якорем, как показано на фиг. 1715, или коротко замкнутой подобно фиг. 1716. Для уменьшения напряжения поля возбуждения E_{T_y} необходимо выбрать поле возбуждения и число витков возможно малым. Это влечет за собой небольшой воздушный зазор, как в асинхронных моторах, и высокую нагрузку якоря током.



Фиг. 1714 а-б.



Фиг. 1715 а-б.

В моторах постоянного тока напряжение реактанца компенсировано полем дополнительных полюсов (стр. 1224); также и в однофазных моторах возможно использовать дополнительное поле для уничтожения напряжений, возникающих в секциях коротко замкнутых щеткам.

Эти напряжения следующие:

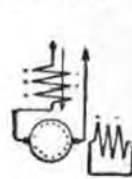
1. Напряжение трансформации, возникающее от поля возбуждения, направленного перпендикулярно к осям щеток. Это напряжение отстает на 90° от поля Φ_y и от тока мотора.

2. Напряжение реактанца (напряжение коммутации тока), возникающее от перемещы направления тока в секциях якоря, подобное напряжению в моторах постоянного тока (стр. 1223). Это напряжение совпадает по фазе с током мотора, так как оно изменяется по синусоиде пропорционально силе тока (по времени).

3. Напряжение вращения (напряжение коммутации) возникает от вращения проводов коротко замкнутых секций в поле коммутации:

это поле должно быть направлено по осям щеток; напряжение вращения совпадает по фазе с полем коммутации, и при простом последовательном соединении совпадает по фазе с током мотора.

Геометрическая сумма этих трех напряжений не должна превосходить для безыскровой работы 2V (напряжение искробразования). Иными словами, напряжение вращения, если не имеется соответствующий между секцией и коллектором, поглощающих избыток напряжения, должно уравнивать напряжение реактанца и трансформации до 2V. Если соответствующим выбором размеров частей мотора напряжению трансформации при всех нагрузках не превышает 2V, то для получения напряжения вращения достаточно поля, возбуждаемого простой обмоткой, соединенной последовательно, как на фиг. 1717. Напряжение трансформации остается при этом не уравновешенным, так как напряжение вращения находится в фазе с током мотора, напряжение же трансформации перпендикулярно к ним; напряжение коммутации тока при этой схеме полностью уравновешивается (мотор последовательного соединения). Если напряжение трансформации при работе больше 2V, то необходима компенсация его дополнительным полем, имеющим слагающую, отсезающую на 90° от мотора. Такого рода сдвиг фаз можно получить или параллельным включением сопротивлений (Эрликон, фиг. 1718), или присоединением дополнительного полюса параллельно к обмоткам мотора (фиг. 1716); T_2 — вторичная обмотка трансформатора.



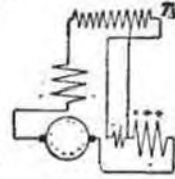
Фиг. 1716.



Фиг. 1717.



Фиг. 1718.



Фиг. 1719.

Компенсация напряжения трансформации возможна только при определенном режиме работы мотора, если не предполагают во время работы регулировать вспомогательное поле. Регулировка вспомогательного поля дает возможность компенсировать напряжение трансформации при разных режимах работы, но требует сложных переключающих приспособлений. Напряжение трансформации не может быть компенсировано при неподвижном моторе. Это явление весьма существенно и влияет на расчет всех однофазных моторов, предназначенных для пуска в ход с нагрузкой, в особенности же моторов для электрической тяги. Так как сервесный мотор, в особенности мотор для тяги, должен сохранить свои свойства — большой вращающий момент при пуске, то в поле возбуждения должно иметь определенную величину во избежание значительного увеличения токов якоря. Величина же поля возбуждения ограничена напряжением трансформации в короткозамкнутых щетках секциях. Напряжение трансформации для моторов, выполненных без вышеуказанных сопротивлений, для сколько-нибудь безыскрового пуска

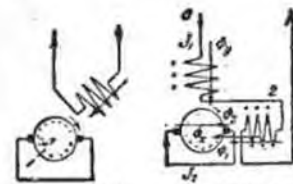
в ход не должно превосходить 3 до 3,3V. В электровозах допускают иногда искрение щеток при пуске, чтобы иметь дело с большими полями и потому с меньшими величинами тока, что существенно для распределительного устройства. Но и в этом случае максимально допустимо 5V, и то приемная во внимание редкий пуск в ход. В общем же и в электровозах не допускают свыше 3,5V. Так как напряжения трансформации прямо пропорционально числу периодов и числу витков между двумя коллекторными пластинами, то в больших моторах (моторы для тяги) выполняют часто витков почти всегда равным 1 и число периодов берут возможно малым. Для электрических ж. д. — $10^{2/3}$ периодов в секунду.

Принятая во внимание число полюсов и число периодов, можно говорить о синхронном числе оборотов в однофазных моторах, но, как вытекает из вышесказанного, серийный мотор, в противоположность другим моторам однофазного тока, ничем не связан с синхронизмом. В общем серийные моторы работают сверхсинхронно, например: моторы с зубчатой передачей для электрических железных дорог имеют число оборотов в пять раз больше синхронного. Сверхсинхронная работа выгодна и потому, что при ней моторы имеют высокий коэффициент мощности, близкий к единице.

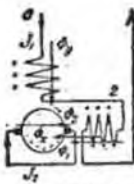
2. Регульсионный мотор. Можно подвести электрическую мощность к яктору мотора не только непосредственно, как в вышеописанном серийном моторе, но также, используя свойства переменного тока трансформаторным действием от статора, играющего роль первичной обмотки (фиг. 1720). Щетки мотора замкнуты тогда на коротко (Гомсон).

Крутящий момент мотора зависит от угла сдвига щеток α . Если угол $\alpha = 90^\circ$, то действие трансформации и ток якоря равны 0, действие поля возбуждения достигает максимальной величины и крутящий момент равен 0. Если угол $\alpha = 0$, то трансформаторное действие и ток якоря достигают максимальной величины, но действие поля возбуждения равно 0 и момент снова равен 0. Между этими двумя положениями щеток, примерно при угле α — от 6 до 10° , находится максимальное значение момента. Для номинального режима работы угол α равен от 14 до 22° , смотря по конструкции мотора. В общем поле статора можно разложить на две составляющие: одну в направлении осей щеток, поле трансформации, другую в направлении, перпендикулярном к первой — поле возбуждения. Регульсионный мотор пускается в ход и регулируется сдвигом щеток. Вследствие этого отпадает необходимость в аппарате для пуска в ход и регулировки. Дальнейшее преимущество мотора: статор совершенно не связан с ротором, поэтому возможно выполнять статор для высокого напряжения. Обмотку статора возможно действительно разделить на две, сдвинутые электрически на 90° обмотки (фиг. 1721¹⁾. (Регульсионный мотор Аткинсона).

Щетки мотора замкнуты тогда на коротко (Гомсон).



Фиг. 1720.

Фиг. 1721¹⁾.

¹⁾ На этой и следующих фигурах стоят J_1, J_2 вместо I_1 и I_2 .

При неподвижном моторе рабочая обмотка статора и короткозамкнутый якорь представляют трансформатор, замкнутый на коротко. Φ_x равно тогда 0 (предполагая магнитный поток без рассеяния) и также равно 0 напряжение у клемм рабочей обмотки. Ток $I_1 = I_2$ (при передаточном числе 1:1) при нормальном напряжении у клемм будет недопустимо велик.

При пуске, от влияния поля Φ_x в обмотке якоря наводится напряжение вращения E_{Ry} в поле Φ_y , и фазе (пренебрегая омическим падением напряжения $I_2 R_2$) с напряжением трансформации E_{Tx} . Соответственно этому напряжению вращения образуется поле Φ_x , перпендикулярное во времени и пространству полю Φ_y . С возрастанием поля Φ_x увеличивается напряжение у клемм рабочей обмотки и ток уменьшается.

При работе наводится следующие, соответственно слагающиеся напряжения в секциях, коротко замкнутых щетками, такие же, как и при работе серийного мотора, а именно:

1. Напряжение трансформации от поля Φ_y ,

2. Реактивное напряжение (напряжение от перемены направления тока) коммутации,

3. Напряжение вращения, от вращения коротко замкнутой секции якоря в поле Φ_x .

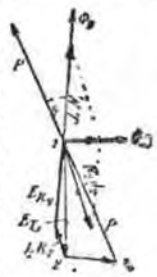
В остальной обмотке якоря, замкнутой на коротко щетками, наводится напряжение:

1. Напряжение трансформации E_{Tx} от поля Φ_x ,

2. Напряжение вращения E_{Ry} от поля Φ_y .

Напряжение трансформации E_{Tx} и напряжение вращения E_{Ry} взаимно уравновешиваясь, дают слагающую, соответствующую омическому падению напряжения тока I_2 . Ток I_2 вместе с полем возбуждения Φ_y образует крутящий момент (фиг. 1721).

При вращении мотора рабочая обмотка, вместе с коротко замкнутой обмоткой якоря, образует не короткозамкнутый трансформатор, как при неподвижном моторе, но трансформатор в работе (нагруженный). Как и при работающем трансформаторе (стр. 1310), слагаются первичные АВ (рабочая обмотка), которым соответствовало бы поле Φ_1 , и вторичные АВ (обмотки якоря), которым соответствовало бы поле Φ_2 , и дают результирующее АВ, создающее общее поле Φ_x . Это поле наводит в рабочей обмотке Э.Д.С., равную приложенному к обмотке напряжению (фиг. 1722). В фазе с АВ рабочей обмотки, так как обе обмотки соединены последовательно, находятся также АВ обмотки возбуждения и следовательно поле возбуждения Φ_y . Итак, поля Φ_x и Φ_y сдвинуты во времени на 90° друг от друга. Так как они в пространстве также сдвинуты на 90° , то они образуют вращающееся поле в общем случае эллиптическое, так как поля Φ_x и Φ_y неравны между собой.



Фиг. 1722.

Отношение величин обоих полей получаются из следующего:

Напряжение трансформации;

$$E_{T_x} = 4,44 f_w f (z : 4a) \Phi_x 10^{-8}$$

Напряжение вращения:

$$E_{R_y} = (pn/a 60) z (1 : \sqrt{2}) \Phi_y 10^{-8} \text{ В.}$$

f_w , если обмотка равномерно распределена по окружности, равно:

$$2 : \pi, \quad 4,44 = (2\pi : \sqrt{2}).$$

Если пренебречь омическим падением, напряжение E_{T_x} должно быть равным E_{R_y} ,

$$\text{отсюда } \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} z \frac{\Phi_y}{\sqrt{2}} 10^{-8} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot f \frac{z}{4a} \Phi_x 10^{-8} \text{ и след. } \frac{\Phi_x}{\Phi_y} = \frac{pn}{60f}.$$

Обозначим n_s — синхронное число оборотов (стр. 1290) и тогда:

$$f = (pn_s : 60); \quad (\Phi_x : \Phi_y) = (n : n_s).$$

Если $n = 0$ (неподвижный мотор), тогда (ср. фиг. 1723) $\Phi_x = 0$ (см. выше) подобно коротко замкнутому трансформатору (а).

Если $n < n_s$ (число оборотов мотора меньше синхронного) $\Phi_x < \Phi_y$, эллиптическое поле (б).

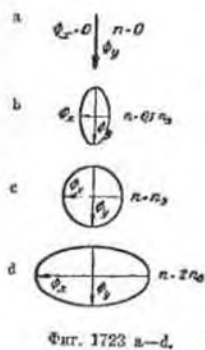
Если $n = n_s$ (число оборотов равно синхронному) $\Phi_x = \Phi_y$, круглое поле (с).

Если $n > n_s$ (число оборотов мотора больше синхронного) $\Phi_x > \Phi_y$, эллиптическое поле (д).

Если мотор пустит и ход при постоянном поле возбуждения Φ_y , то поперечное поле Φ_x увеличивается пропорционально числу оборотов. Поле возбуждения можно иметь постоянным, если держать постоянным ток мотора, меняя напряжение у клемм.

В работе при постоянном напряжении у клемм при увеличении крутящего момента необходимо должно увеличиваться произведение $\Phi_y I_2$. I_2 возрастает и вместе с ним возрастает также I_1 , вследствие этого возрастает и Φ_y до тех пор, пока произведение $\Phi_y I_2$ достигнет величины, соответствующей новому крутящему моменту. С возрастанием Φ_y увеличивается E_{T_y} и уменьшается E_{T_x} при постоянном напряжении у клемм, и как следствие уменьшается Φ_x . Меньшей величине E_{T_x} соответствует меньшее значение E_{R_y} , получаемое в более сильном поле Φ_y и при меньшем числе оборотов. Таким образом, большему моменту соответствует меньшее число оборотов. Регуляционный мотор обладает характеристикой сериесного мотора.

Отношение величин обеих полей Φ_x и Φ_y играет решающее значение при явлениях, происходящих в секциях, замкнутых на коротко щетками, в которых имеет место коммутация. Если отвлечься от реактивного напряжения, которое не компенсируется, то поле возбуждения Φ_y



Фиг. 1723 а—д.

наводит в коротко замкнутой секции с w — витками, так же, как и в сериесном моторе, напряжение трансформации:

$$e_T = 4,44 f w \Phi_y 10^{-8} = (2\pi : \sqrt{2}) (pn_s : 60) w \Phi_y 10^{-8} \text{ В} = c n_s \Phi_y.$$

Поле Φ_x наводит в этой же секции напряжение вращения:

$$e_R = (2\pi : \sqrt{2}) (pn : 60) w \Phi_x 10^{-8} \text{ В} = c n \Phi_x.$$

Напряжение вращения компенсирует напряжение трансформации только при соотношении:

$$n : n_s = \Phi_y : \Phi_x.$$

Отношение же этих полей согласно вышерассужденному выводу равно:

$$n : n_s = \Phi_x : \Phi_y.$$

Вследствие этого напряжение вращения уравнивает напряжение трансформации только тогда, когда $\Phi_x = \Phi_y$ и также $n = n_s$, т. е. при синхронной работе.

Если мотор работает при числе оборотов, меньшем синхронных, то напряжение трансформации можно регулировать повышением тока возбуждения Φ_y . При работе же мотора с числом оборотов, большим синхронных, достичь такого результата с напряжением вращения невозможно. Поэтому при работе мотора с числом оборотов, большим синхронных, некомпенсирование напряжения искробразования $e_p = e_T - e_R$ очень быстро возрастает.

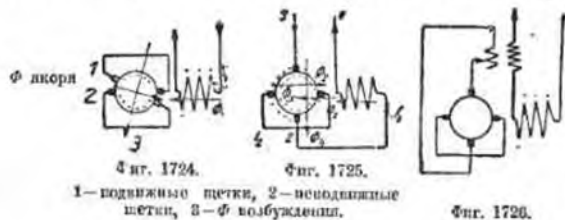
Регуляционный мотор на основании вышесказанного не может иметь числа оборотов выше синхронных — значительная невыгода в сравнении с сериесным мотором. Как мотор для электрических ж. д. регуляционный мотор не может быть применен, так как при малом числе периодов $16\frac{2}{3}$, он должен был бы быть выполнен с малым числом полюсов.

Для больших же чисел периодов регуляционный мотор, вследствие чрезвычайно простого пуска в ход, регулирования числа оборотов и перемены направления вращения простым передвижением щеток, имеет большое применение для различных целей. Перемена направления вращения достигается передвижением щеток в обратном направлении. Невыгоден в регуляционном моторе малый коэффициент мощности, который имеет место даже при работе с синхронным числом оборотов.

Регуляционный мотор с двойным числом щеток — мотор Дэри (исполненный фирмой Брун-Бовери) — имеет те же свойства, что и нормальный регуляционный мотор (фиг. 1724). Так же, как и нормальный мотор, мотор Дэри может быть выполнен на высокое напряжение, так как ротор совершенно независим от статора. Так же как и нормальный мотор, мотор Дэри можно легко пускать в ход, регулировать число оборотов и изменить направление его вращения простым передвижением щеток, но как и нормальный регуляционный мотор, мотор Дэри не может иметь числа оборотов выше синхронного.

Компенсированный регуляционный мотор (системы Вентер-Эйхберг) имеет в настоящее время только исторический интерес.

[AW — возбуждения были расположены на якоре. В остальной схеме мотора Винтер-Эйхберга соответствовала схеме репульсионного мотора. Возбуждения от якоря имело место с помощью особых щеток возбуждения, через которые ток подводился к якору, соединенному последовательно с рабочей обмоткой (фиг. 1725).



Если применить трансформатор напряжения (фиг. 1726), то можно и в этом случае иметь статор независимым от ротора и, таким образом, выполнять статор на высокое напряжение.

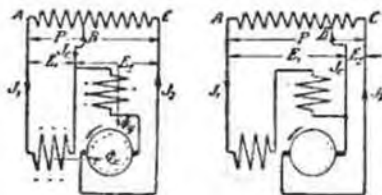
Мотор Винтер-Эйхберга, обладающий свойствами репульсионного, не может иметь числа оборотов выше синхронных и неприменим для целей электрической тяги ввиду низкого числа периодов последней. В прежние время этот мотор применялся при большом числе периодов для разных случаев, где требовалась характеристика серийного мотора].

3. Серийно-репульсионный мотор (мотор двойного питания)

В серийном моторе вся электрическая мощность подводится к якору непосредственно. В репульсионном моторе вся электрическая мощность передается якору трансформаторным действием. В моторе двойного питания часть мощности подводится к якору непосредственно, другая же часть передается трансформаторным действием. Цель двойного питания состоит в том, чтобы установить соотношение величин полей в направлении пространственных осей X и Y полей Φ_x и Φ_y таким и во времени влиять на поле в направлении оси X так, чтобы при коммутации в секции, находящейся в рабочей оси, напряжение вращения от поля Φ_x уравновешивало напряжение трансформации от поля Φ_y не только при синхронной работе мотора, но и при всевозможных оборотах его. Выше, при исследовании репульсионного мотора, было выведено необходимое для такой компенсации соотношение величин полей: оно должно быть

$$\Phi_y : \Phi_x = n : n_s$$

Из этого условия вытекает, что при работе с числом оборотов, меньшим синхронных, поле возбуждения должно быть ослаблено, рабочее же поле Φ_x должно быть усилено. При работе с числом оборотов, большим синхронных, следует, наоборот, усилить поле возбуждения и ослабить поле Φ_x .



Фиг. 1727.

Фиг. 1728.

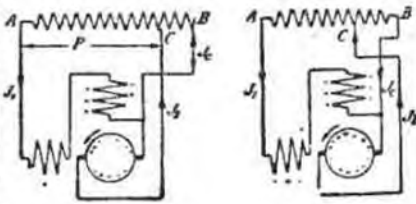
Двойное питание можно выполнить, напр., по схемам фиг. 1727 и 1728 с помощью разделителя суммарного напряжения P (напряжение у клемм) на два напряжения, приложенные к якору и рабочей обмотке в известном соотношении, так что при работе с числом оборотов, большим синхронного, получается необходимое соотношение величин поля в направлении обеих пространственных осей (это соотношение следует установить в зависимости от числа оборотов).

При этом соединении поле в направлении оси X также и по времени обладает соответствующей фазой, так как витки рабочей обмотки в направлении оси X и витки якоря образуют друг с другом как бы трансформатор в рабочем состоянии (при нагрузке, см. (стр. 1292)). Поле Φ_x общее тем и другим виткам, имеет сдвиг в 90° по времени в отношении тока, так же, как и наводимое в коротко замкнутой, коммутирующей секции напряжение вращения. Поэтому напряжения в этой секции e_{R_x} и e_{T_y} , примерно, совпадают во времени по фазе.

Если на фиг. 1727 точки B и A совпадут, то мы получим серийный мотор с короткозамкнутой компенсационной обмоткой (стр. 1288). Поле Φ_x компенсируется при всех числах оборотов. Если на фиг. 1728 точка B совпадает с C , то получим репульсионный мотор (стр. 1263). Поле Φ_x тогда возрастает при увеличении числа оборотов, так что при синхронном числе оборотов становится равным полю Φ_y (круговое поле). При этом соединении (репульсионный мотор) при числе оборотов, большем синхронных, поле Φ_x очень скоро увеличивается, так что напряжение вращения e_{R_x} и поле Φ_y становится больше, чем напряжение трансформации e_{T_y} в поле Φ_x (стр. 1293). Пере-

движением точки B от точки C , при синхронизме до точки A , при числе оборотов, большем синхронных, можно установить по желанию соотношение полей $\Phi_y : \Phi_x = n : n_s$. Таким образом двойное питание дает возможность компенсировать напряжение трансформации в коммутирующей секции так же и при числе оборотов, большем синхронного. Необходимое усиление поля Φ_x при числе оборотов, меньшем синхронного, можно было бы получать, передвигая точку B за точку C направо, как указано, напр., на фиг. 1729. Можно достигнуть тех же результатов и не передвигая точки C , но меняя место точек B и C , как указано на фиг. 1730, так как важно соотношение полей. Безыскровой коммутации можно также достигнуть, как и при серийном и репульсионном моторе, ослабляя Φ_y понижением напряжения питания, в особенности при пуске в ход.

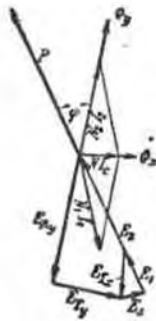
Общее поле Φ_x , расположенное в пространстве по направлению оси X , сдвинуто в репульсионном моторе во времени на 90° по отношению поля Φ_y . Это поле во времени совпадает с направлением



Фиг. 1729.

Фиг. 1730.

оси X . Двойным питанием можно его сдвинуть на больший или меньший угол в отношении оси X . Этот сдвиг может иметь такую величину, что две слагающие поля, совпадающие по времени с осями X и Y , получают такое значение, что в короткозамкнутой секции компенсируется не только напряжение трансформации, но и напряжение коммутации, сдвинутое на 90° в отношении напряжения трансформации.



Фиг. 1731.

Упрощенная диаграмма двойного питания по фиг. 1727, если пренебречь омическим и индуктивным сопротивлением, изображена на фиг. 1731. Напряжения E_1 и E_2 совпадают по фазе, так как они наводятся одним и тем же потоком. Напряжение E_1 уравновешивается напряжением трансформации E_{T_x} от общего поля Φ_x и напряжением рассеяния статора E_s от поля рассеяния статора Φ_x . E_{T_x} отстает на 90° от поля Φ_x . E_s отстает на 90° от фазы тока I_1 . Напряжение E_2 уравновешивается следующим образом:

1. Тем же указанным выше напряжением трансформации E_{T_x} , наводимым полем Φ_x в обмотке якоря. Величина напряжения трансформации при передаточном числе 1:1 та же, что и раньше.

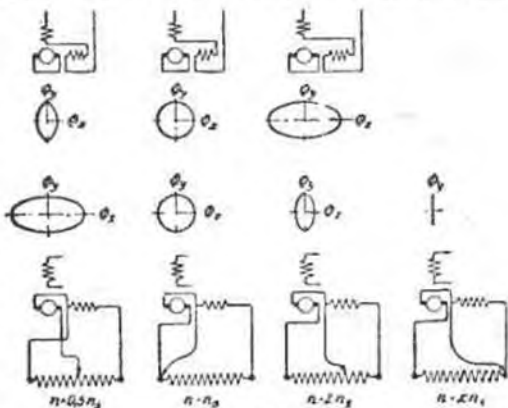
2. Напряжением трансформации E_{T_y} , наводимым полем Φ_y в обмотке возбуждения. Это напряжение отстает на 90° от поля Φ_y .

3. Напряжением вращения E_{R_y} , наводимым полем Φ_y в обмотке якоря. Это напряжение при левом вращении противоположно по фазе полю Φ_y . Ток I_2 совпадает по фазе с полем Φ_y . Векторная сумма $I_2 \hat{+} I_c = I_1$. Соединение к B дает ток намагничивания I_c для поля Φ_x . I_c совпадает по фазе с полем Φ_x , которое по времени сдвинуто на 90° в отношении наводимого им напряжения E_{T_x} в рабочей обмотке.

Общее поле Φ_x можно разложить на слагающую в направлении I_2 для компенсации реактивного напряжения в короткозамкнутой секции и на другую слагающую, перпендикулярную к первой, для компенсации напряжения трансформации в той же секции. При необходимости возможно, напр., включением дроссельной катушки в соединении к B так повернуть направление поля Φ_x , что и реактивное напряжение будет компенсировано при всех числах оборотов. Необходимую величину поля можно получить передвижением точки B .

Вынужденное при помощи двойного питания распределение обих полей в пространстве по осям X и Y для получения безискровой коммутации при различных числах оборотов в сравнении этих полей с самоустанавливающимися полями в направлении тех же осей при репульсионном моторе схематически представлено на фиг. 1732 в предположении, что величина поля возбуждения от всех

случаев одинакова (Döry, Einphasenbahnmotoren, Vieweg & Sohn). Коэффициент мощности при двойном питании наилучший, так же, как и в серийном моторе, при числе оборотов, на много большем, чем синхронные, и наилучший же — при числе оборотов, меньшем синхронного. Особенно плохой коэффициент мощности при пуске в ход. В репульсионных моторах коэффициент мощности изменяется в противоположном направлении. Поэтому было бы целесообразно большие моторы (для электрической тяги) пускать в ход, как репульсионные моторы, затем с увеличением числа оборотов перейти к двойному питанию и, наконец, работать ими в качестве серийного мотора. В практике редко пользуются такой схемой, так как распределительное устройство получается слишком сложным.



Фиг. 1732.

с) Действие коллекторных моторов трехфазного тока.

Коллекторные машины трехфазного тока являются также возбужденными трехфазного тока (стр. 1281). Трехфазные коллекторные моторы и являются до известной степени компенсированными асинхронными моторами (стр. 1282).

1. Трехфазный серийный мотор. В статоре синхронного мотора (стр. 1267) три фазы трехфазного тока создают, как известно, вращающееся поле. Относительная скорость поля ротора синхронного мотора по отношению к полю статора при работе равна 0.

В якоре постоянного тока одноякорного преобразователя (стр. 1322) трехфазный ток, подводимый к якору с помощью кольцевого коллектора, создает также вращающееся поле. Это поле при неподвижном якоре вращается с синхронным числом оборотов. Если якорь вращается, картина распределения токов в якоре вращается также. Поэтому в случае вращения якоря с синхронным числом оборотов в противоположную сторону вращающееся поле неподвижно в пространстве. Его относительная скорость по отношению к неподвижному полю возбуждения равна 0 (при работе).

В якоре трехфазного коллекторного мотора типа постоянного тока, питаемого трехфазным током с помощью трех щеток, отстоящих друг от друга на 120° , возникает при неподвижном якоре поле, вращающееся со скоростью, соответствующей синхронному числу

оборотов. Так как из-за коллектора картина распределения токов в пространстве и, как следствие, поле независимы от числа оборотов, то это поле, вращающееся с синхронной скоростью, остается независимым от числа оборотов и направления вращения якоря. Направление вращения поля зависит от последовательности подвода максимума тока к щеткам. Направление вращения якоря может быть обратное направлению вращения поля.

В трехфазном коллекторном серийном моторе ¹⁾ подобный якорь типа постоянного тока вращается в статоре трехфазного тока. Ток к обмотке якоря подводится через обмотку статора (последовательное соединение, фиг. 1733). Такой мотор с неподвижными щетками и дополнительными полюсами находит применение при небольшом переменном числе периодов в агрегатах для регулировки (стр. 1280): если применить подвижные щетки и обойтись без дополнительных полюсов, то

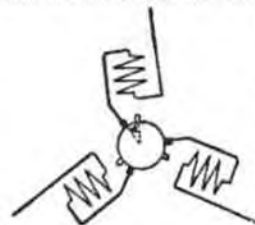
мотор применяется для привода машин, где требуется регулирование числа оборотов от 0 до 1,3 синхронных оборотов.

Полюса статора и ротора вращаются в одну сторону с синхронным числом оборотов независимо от направления вращения и числа оборотов якоря. Относительная скорость полей статора и ротора равна 0. Сдвиг этих полей в пространстве по отношению друг к другу зависит от положения щеток. Передвигая щетки, можно просто менять взаимное расположение полей. При этом возможны два основных случая:

1. Положение короткого замыкания. Щетки в нулевом положении. Угол $\alpha = 0$. Ротор и статор включены друг против друга. Общее поле не может образоваться, так как поле статора и ротора взаимно уничтожаются. Обе обмотки, если пренебречь рассеянием, представляют собой в этом случае только омические сопротивления. Крутящий момент равен 0.

2. Положение холостого хода. Щетки сдвинуты на 180° . Угол $\alpha = 180^\circ$. Статор и ротор включены в одном направлении. Обе обмотки представляют собой дроссельную катушку. Крутящий момент равен 0.

Крутящий момент, при положении щеток между двумя вышеуказанными не равен нулю и при постоянной величине тока пропорционален синусу угла α . Направление вращения якоря зависит от направления сдвига щеток независимо от направления вращения вращающегося поля (возможно вращение якоря и против вращения поля, см. строку 6 сл.). На практике якорь должен вращаться при большом числе оборотов вращающегося поля в направлении вращения поля так как в противном случае получается очень плохая коммутация и слишком большие потери в желез. Поэтому при изменении направления вращения необходимо, кроме сдвига щеток, переключить еще фазы. Коллекторный мотор трехфазного тока, так же, как и репульсионный мото



Фиг. 1733.

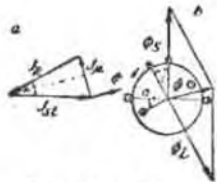
можно пускать в ход и регулировать числа оборотов без потери с помощью сдвига щеток. Схема мотора в общем виде представлена на фиг. 1734.

Статор соединен в звезду, ротор — в треугольник. Передаточное число обмоток равно 1:1. При этом соединении число витков в роторе должно быть в $\sqrt{3}$ больше, чем в статоре. Кроме того, коэффициент обмотки в статоре лучше, чем в роторе, так что ротор должен иметь еще некоторое добавочное число витков для компенсации коэффициента обмотки. Если ток ротора I_L , то ток статора $I_S = I_L \sqrt{3}$. Сдвиг фаз во времени достигает 30° .



Фиг. 1734.

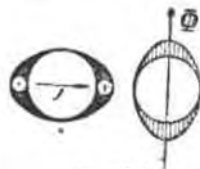
Фиг. 1735.



Фиг. 1736 a—b.

Для большей простоты ¹⁾ возможно применить упрощенную схему (фиг. 1735) с соединением ротора в звезду и с одинаковым числом витков, одинаковыми коэффициентами обмотки и при совпадении по фазе токов статора и ротора. При этой схеме при угле сдвига α получается пространственная диаграмма ампер-витков, или при равенстве витков — пространственная диаграмма токов согласно фиг. 1736a.

Ампер-витки в роторе и статоре создают результирующее поле Φ согласно фиг. 1736b (положение в пространстве). Если предположить, что ток и поле изменяются по синусоиде, можно рассматривать фигуры 1736a и b, как векторные диаграммы (в пространстве). Так как поле 0 соответствует точке максимального тока (фиг. 1737) и обратно, ток



Фиг. 1737.



Фиг. 1738.

и соответствующее поле находится под углом и 90° по отношению друг к другу (в пространстве), то, как следствие, под таким же углом результирующее поле Φ и ток I_μ . По времени I_S , I_L , I_μ и Φ совпадают по фазе! Φ_S и Φ_L — фиктивные поля.

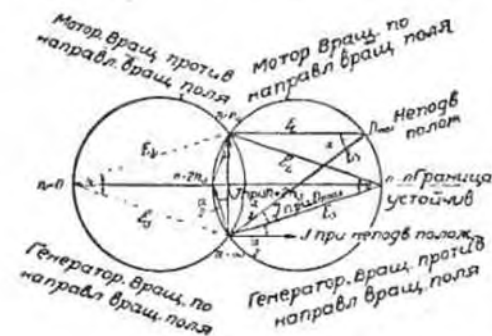
Из этих диаграмм поля и ампер-витков можно вывести направление вращения якоря. На фиг. 1736 щетки сдвинуты по отношению к статору влево. Из положения токов и полей следует, что должно быть вращение в левую сторону (правило левой руки!). В фиг. 1738 щетки сдвинуты по отношению к статору направо. Из положения токов и полей следует, что вращение должно быть в правую сторону (правило правой руки!).

Итак независимо от направления вращения поля: направление вращения якоря зависит от направления сдвига щеток.

Если угол $\alpha = 0$, то общее поле Φ также равно 0, так как ток $I_{\mu} = 0$ — положение короткого замыкания.

Если угол $\alpha = 180^\circ$, то общему полю соответствует ток $I_{\mu} = 2I$, приведенный к виткам статора и мы имеем положение холостого хода.

Вращающееся с синхронным числом оборотов общее поле Φ наводит при сдвиге щеток на угол α в обеих обмотках напряжения, сдвинутые по отношению друг к другу во времени на угол α . Этот сдвиг происходит оттого, что независимо от числа оборотов якоря сдвиг щеток на угол α сдвигает трехфазную обмотку якоря на этот же угол α по отношению к обмотке статора. Оба напряжения — напряжение якоря E_L и напряжение статора E_S в сумме (если пренебречь омическим и индуктивным падением напряжения в обеих обмотках) — уравновешивают напряжение у клемм, т. е. $P = E_S \wedge E_L$. Эта компенсация происходит при сдвиге напряжений E_S и E_L на угол α между собой. Отношение величин



Фиг. 1739.

напряжения статора $E_S = P$. Геометрическое место концов векторов двух напряжений, сдвинутых между собой на угол α и в сумме дающих напряжение P , есть окружность, построенная на хорде, равной P , при вписанном угле, равном α . Таким образом угол, заключенный между напряжениями якоря и статора E_L и E_S , всегда будет α . Так как ток находится в фазе (по времени) между собой и с результирующим полем Φ , то ток I отстает от напряжения статора на угол $1/2\alpha$ и опережает напряжение якоря E_L также на угол $1/2\alpha$. При неподвижном якоре ток отстает на 90° от напряжения у клемм (фиг. 1739), при синхронном числе оборотов отстает на угол $1/2\alpha$; при числе оборотов, равном двойному синхронному, ток и напряжение у клемм в фазе, т. е. $\cos \varphi = 1$.

При числе оборотов от синхронного до двойного синхронного $\cos \varphi$ изменится от $\cos \frac{\alpha}{2}$ до 1. Таким образом $\cos \varphi$ имеет большое значение, так как угол α при работе равен, примерно, 30° ($\cos 15^\circ = 0,966$). При числе оборотов, большем двойного синхронного, трехфазный коллекторный мотор может отдавать в сеть намагничивающий ток. Если якорь мотора вращать внешней силой в направлении, обратном его вращению, то мотор работает генератором независимо от направления вращения вращающегося поля.

Из геометрических соотношений диаграммы напряжений (по времени) (фиг. 1739) можно вывести, что вращающий момент, если пренебречь рассеянием, равен:

$$M_d = C_2 E_S^2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}.$$

Максимальное значение этого момента при постоянном угле сдвига щеток равно

$$M_{d\max} = C_2 E_{S\max}^2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$$

и наступает тогда, когда E_S достигает максимума. Из фиг. 1739 можно легко определить для различных режимов работы $n:n_S$ соответствующие

$$\frac{D}{D_{\max}}$$
 моменты:

$$E_S = cn_S \Phi; \quad E_L = c(n_S - n) \Phi; \quad n:n_S = 1 - (E_L:E_S).$$

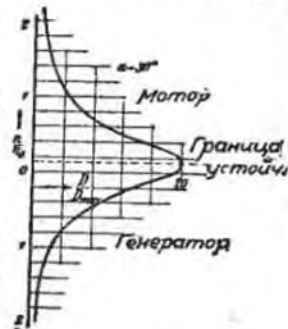
На фиг. 1740 изображены значения кривой крутящих моментов для нормального сдвига щеток (30°). Как видно, мотор имеет ясно выраженную сериюсерную характеристику. С удлинением вращающегося момента до определенного максимального значения число оборотов мотора падает. После достижения максимальной величины вращающийся момент уменьшается, но число оборотов мотора продолжает понижаться. Мотор имеет предел устойчивости, при повышении которого мотор останавливается подобно асинхронному мотору, останавливающемуся, если момент сопротивления превышает максимальный момент мотора. Сдвиг щеток α при работе зависит от требуемого режима работы — способности к перегрузке, вращающегося момента при пуске и т. п. Так как при работе с синхронным числом оборотов потери в железе равны 0, то следует стремиться, по возможности, к этому режиму работы. Расчет моторов см. в *Handb. d. ETZ*, 1920, S. 265. Характеристические кривые см. стр. 1305.

На фиг. 1741 изображена схема соединения трехфазного сериесного мотора с промежуточным трансформатором и двойным числом щеток²⁾

¹⁾ На фиг. 1740 вместо обозначения D/D_{\max} (внутри кривой!) следует поставить

$M_d/M_{d\max}$.

²⁾ ETZ 1912, S. 473.

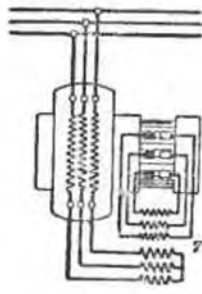


Фиг. 1740 1).

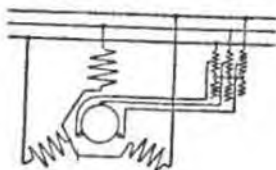
(выполняется фирмой Сименс-Шукерт). Один комплект — неподвижные щетки (изображены на схеме черным), другие — подвижные (на схеме — белым) служат для регулирования числа оборотов. Характеристические линии числа оборотов см. стр. 1305.

2. **Трехфазный мотор с шунтовой характеристикой.** Если соединенный в звезду статор коллекторного трехфазного мотора присоединить к сети при неподвижном незамкнутом роторе, то в статоре образуется вращающееся поле, которое наводит в неподвижном роторе трехфазное напряжение E_L . При отношении числа витков обмотки статора к обмотке ротора, равном 1:1 (передаточное число), напряжение E_L равно напряжению у клемм статора E_S . Если вращать ротор в направлении вращения поля, то напряжение, наводимое в роторе, уменьшается с увеличением числа оборотов и при синхронном числе оборотов падает до 0. Наводимое в роторе напряжение вследствие 1 коллектора имеет число периодов, равное числу периодов статора. Этим коллекторный мотор отличается от асинхронного, напряжение на кольцах которого имеет число периодов, соответствующее скольжению мотора (стр. 1276). Если ротор коллекторного мотора вращать со сверхсинхронной скоростью, то в якоре наводится напряжение, противоположное по знаку, величина которого при числе оборотов, равном двойному синхронному, снова делается равной напряжению статора. Объясняется это тем, что при числе оборотов, равном двойному синхронному, относительная скорость поля статора по отношению к проводам якора равна синхронной скорости так же, как и при неподвижном роторе. Если при синхронном числе оборотов мотора замкнуть накоротко щетки мотора и нагрузить мотор, работающий тогда, как асинхронный двигатель, то вследствие скольжения, так же, как и в асинхронном моторе (стр. 1275), образуется сильный ток в проводах якора, который совместно с вращающимся полем создает крутящий момент.

В этом случае мотор обладает всеми свойствами асинхронного двигателя. Число оборотов его независимо от нагрузки близко к синхронному. Чтобы заставить мотор вращаться с другим числом оборотов, необходимо к щеткам якора приложить особое напряжение. Это напряжение по величине и фазе, если пренебречь падением напряжения, получающимся от омического и индуктивного сопротивления, должно уравновешивать напряжение, наводимое в проводах якора при числе оборотов, отличающемся от синхронного. Одна из возможных схем включения мотора указана на фиг. 1742, где необходимое переменное, в зависимости от числа оборотов, напряжение подводится при помощи авто-



Фиг. 1741.



Фиг. 1742.

трансформатора с отводами. Для получения числа оборотов выше синхронного необходимо подвести к ротору напряжение противоположного знака. Для этой цели обмотки автотрансформатора продолжены дальше нулевой точки.

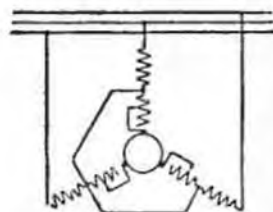
Если напряжение статора $E_S = e n_s \Phi$, где синхронное число оборотов — n_s , напряжение ротора $E_L = c (n_s - n) \Phi$ при передаточном числе обмоток, равным 1:1, отсюда

$$n = n_s [1 - (E_L : E_S)].$$

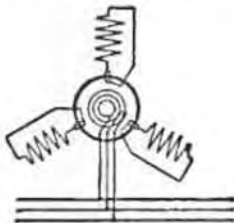
Число оборотов, так же, как и в шунтовом моторе постоянного тока, независимо практически от нагрузки в широких пределах. Мотор обладает шунтовой характеристикой. Регулирование числа оборотов возможно без потерь изменением подводимого к якору напряжения E_L .

Подобный шунтовой мотор трехфазного тока применим всюду, где для привода разного рода машин, напр. станков, необходимо установить постоянное число оборотов.

Фирма АЕГ использует обмотку статора мотора как автотрансформатор¹⁾, для получения переменного напряжения, подводимого к якору (см. фиг. 1743, где указано соединение для получения числа оборотов выше синхронного). Регулировка происходит при помощи контроллера, соединяющего якора с точками статора, имеющими различное напряжение. Регулировка имеет от 6 до 12 положений, при чем число оборотов меняется от 1:3 до 1:4. Сдвиг фаз может быть в известных пределах укомпенсирован тем, что не только величина, но и фаза подводимого к якору напряжения может быть подобрана известным образом. Поле мотора при таком способе регулирования остается постоянным. Мотор может развить тот же крутящий момент при разных числах оборотов. Мощность мотора таким образом возрастает пропорционально числу оборотов. При небольшом числе оборотов, вследствие плохого



Фиг. 1743.



Фиг. 1744.

охлаждения, мощность мотора при длительной работе понижается больше, чем соответственно число оборотов. При числе оборотов, значительно превышающем синхронное, ухудшается коммутация, вследствие чего приходится работать при уменьшенном крутящем моменте. Поэтому в этих условиях рз отл м.мо рсчит лзть тол.ко на мощность, рзную мощность мотора при синхронном числе оборотов.

¹⁾ ETZ, 1910, S. 749—El. u Maschinenb., Wien, 1910, S. 958.