

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт энергетики и природопользования

Безик В.А., Башлыков В.А., Ковалев В.В.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебное пособие

для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,

15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Брянская область 2022

УДК 621.313 (076)
ББК 31.279
Б 39

Безик, В. А. Специальные электрических машины: учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств / В. А. Безик, В. А. Башлыков, В. В. Ковалев. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. – 52 с.

Учебное пособие содержит необходимые краткие теоретические сведения, контрольные вопросы. Пособие предназначено для использования при проведении практических работ со студентами направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Рецензент: д.т.н. профессор кафедры автоматики, физики и математики Погоньшев В.А.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией института энергетики и природопользования, протокол № 4 от 28.01.2022 г.

© Брянский ГАУ, 2022
© Безик В.А. 2022
© Башлыков В.А., 2022
© Ковалев В.В., 2022

Содержание

Общие сведения по специальным электрическим машинам.....	4
1. Специальные электрические машины постоянного тока.....	7
1.1 Генератор с тремя обмотками возбуждения	7
1.2 Генераторы с расщепленными полюсами	8
1.3 Генераторы поперечного поля.....	9
1.4 Тахогенератор постоянного тока.....	11
1.5 Бесконтактный двигатель постоянного тока.....	12
1.6 Исполнительные двигатели постоянного тока.....	17
1.7 Контрольные вопросы	20
2. Специальные асинхронные машины.....	22
2.1 Асинхронные машины с двумя роторами	22
2.2 Магнитогидродинамические двигатели	22
2.3 Линейные асинхронные двигатели	23
2.4 Двухмерная и трехмерная электрические машины	26
2.5 Асинхронные двигатели с катящимся ротором.....	27
2.6 Исполнительные асинхронные машины автоматических устройств	28
2.7 Электрические машины гироскопических систем	33
2.8 Контрольные вопросы	33
2.9 Машины систем синхронной связи.....	33
2.10 Контрольные вопросы	38
3 Специальные синхронные машины.....	39
3.1 Синхронные машины со сверхпроводящими обмотками.....	39
3.2 Машины с постоянными магнитами	40
3.3 Магнитоэлектрические машины.....	41
3.4 Машины с клювообразным ротором.....	42
3.5 Индукторные синхронные машины.	44
3.6 Шаговые двигатели.....	47
3.7 Гистерезисные двигатели	47
3.8 Синхронная машина двойного питания.....	48
3.9 Асинхронизированная синхронная машина.....	48
3.10 Контрольные вопросы	50
Литература	52

Общие сведения по специальным электрическим машинам

Классификация, требования к специальным электрическим машинам, их применение

По величине мощности машины классифицируют так:

1. До 1000 Вт относят к микромашинам.
2. До 10 кВт – к машинам малой мощности.
3. До 500 кВт – к машинам средней мощности.
4. Свыше 500 кВт – к машинам большой мощности.

По частоте вращения ротора n , в мин^{-1} , машины подразделяют на:

1. Тихоходные машины ($n < 300$).
2. Машины средней быстроходности ($300 < n < 3000$).
3. Быстроходные машины ($3000 < n < 60000$).

Специальные машины имеют ряд особенностей, выделяющих эти машины из общего ряда. Применяются при автоматизации электротехнических установок, в системах автоматики, телемеханики и вычислительной техники. В литературе такие машины называют микромашинами.

Микромашины разделяют на пять групп:

1. Силовые микродвигатели, используемые в системах автоматического управления (для примера поворачивают заслонку на магистральном газопроводе).
2. Исполнительные (управляемые) микродвигатели (примеры: набор телефонного номера на автоматической телефонной станции с помощью шагового двигателя, слежение за ракетой).
3. Информационные электрические микромашины (частота вращения ротора преобразуется в выходное напряжение).
4. Микромашины для гироскопических систем (выдерживание заданного курса движения самолетов, судов, ракет).
5. Электромашинные преобразователи и усилители.

Электрические микромашины должны соответствовать общим техническим требованиям по:

1. Надежности работы.
2. Энергетические показатели (η и $\cos \varphi$).
3. Габаритам и массе.
4. Удобство в обслуживании.
5. Номинальным параметрам (U, I, f, P).
6. Нагреву и прочности.
7. По уровню шума.
8. По сопротивлению изоляции.

Кроме указанных общих требований должны обеспечивать:

1. Высокую точность преобразования входного сигнала в выходной.
2. Стабильность выходных характеристик при изменении условий эксплуатации.
3. Линейность характеристик при изменениях управляющего сигнала и нагрузки.

4. Широкий диапазон регулирования.

5. Высокое быстродействие.

Для выполнения перечисленных требований при проектировании специальных электрических машин отступают от принципов оптимального проектирования, принятых для машин общепромышленного назначения по электрическим и магнитным нагрузкам, величине воздушного зазора, энергетическим показателям рабочего режима, уровню шума и радиопомех, радиационной устойчивости.

Отличительные особенности специальных электрических машин. Выполняемые ими функции

Электрические микромашины отличаются от машин средней и большой мощности не только малыми габаритными размерами и мощностью. Для них характерны следующие отличительные особенности:

- иное соотношение параметров обмоток по активному и индуктивному сопротивлениям, так как при уменьшении сечения провода растет активное сопротивление, а с уменьшением глубины пазов снижается индуктивное сопротивление обмоток. Нельзя пренебрегать активным сопротивлением обмотки статора;

- значительно большая величина тока холостого хода по отношению к номинальному (до 90%);

- магнитопровод машины в рабочих режимах оказывается малонасыщенным или ненасыщенным, что делается для повышения линейности выходных характеристик и снижения величины тока холостого хода;

- низкие потери мощности на перемагничивание стали магнитопровода, более низкие значения допустимой магнитной индукции;

- допускаются более высокие плотности тока в проводниках обмоток, так как режимы работы микромашин обычно кратковременные, а теплоотдача с цилиндрической поверхности возрастает с уменьшением диаметра цилиндра;

- увеличенные потери мощности в проводниках обмотки в связи с ростом активного сопротивления проводников;

- низкие энергетические показатели машины;

- широкий диапазон изменения частоты вращения ротора (от двух оборотов за сутки в заводских электрических часах до сорока тысяч оборотов в минуту в шлифовальных инструментах и т.д.);

- малое число пазов на статоре и роторе, что вызывает усиленное влияние высших гармоник магнитного поля на характеристики машины.

Общие требования, предъявляемые к микромашинам, не зависят от выполняемых ими функций. Специфические (специальные) требования относятся лишь к данному типу микромашин и определяются теми функциями, которые эти машины выполняют в процессе работы. В системах автоматики и телемеханики микромашины выполняют следующие специфические функции:

- приводят во вращение различные механизмы; изменяют частоту вращения по заранее заданному закону; контролируют частоту вращения, ускорение

и замедление приводного механизма; осуществляют дистанционное управление механизмом;

позволяют производить электрическое интегрирование и дифференцирование;

преобразовывают механические величины в электрические и наоборот.

Качество и надежность микромашин зачастую определяют качество и надежность сложной и дорогой автоматической системы, управляющей весьма ответственным процессом.

Вопросы

1. Специфические технические требования, предъявляемые к микродвигателям, и пути их выполнения.

2. Влияние специфики применения микродвигателей на их параметры.

3. Какое влияние оказывает снижение габаритов двигателя на его параметры?

4. Общие требования, предъявляемые к микромашинам.

5. Классификация микромашин.

6. Дать сравнительную характеристику электрических машин общего назначения и специального назначения.

7. Функции, выполняемые специальными электрическими машинами.

1. Специальные электрические машины постоянного тока

Во многих случаях к машинам постоянного тока предъявляются такие требования, которым машины нормальной конструкции не удовлетворяют. Это привело к созданию ряда специальных типов машин постоянного тока.

1.1 Генератор с тремя обмотками возбуждения

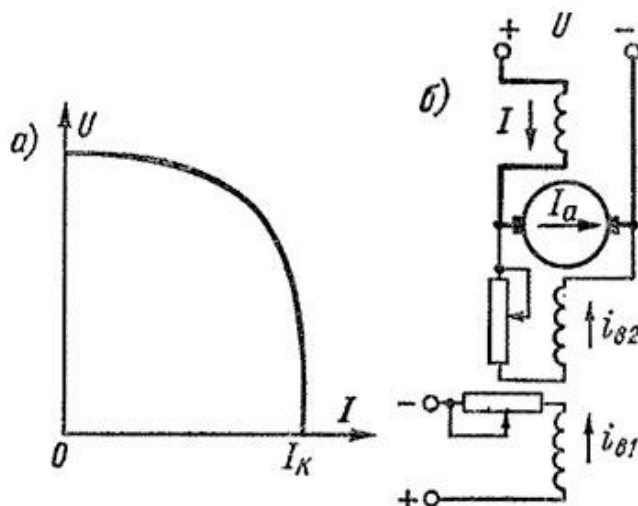


Рисунок 1.1 Внешняя характеристика (а) и схема (б) генератора с тремя обмотками возбуждения

В ряде случаев требуется, чтобы внешняя характеристика генератора имела вид, изображенный на рисунке 1.1а. При характеристике этого вида в широком диапазоне изменения напряжения U ток I изменяется мало и близок к току короткого замыкания I_k . Такая круто падающая внешняя характеристика желательна, например, в случае электрической дуговой сварки, так как при этом ток в дуге мало зависит от ее длины и короткое замыкание (соприкосновение электрода со свариваемым изделием) неопасно. Генераторы с такой характеристикой целесообразно использовать также для питания по схеме Г-Д электродвигателя механизма, работающего на упор, например экскаватора. В этом случае при застревании и остановке механизма ток и момент двигателя будут ограничены, в результате чего исключается возможность повреждения механизма или машины. Характеристику вида рисунка 1, а можно получить в генераторе с тремя обмотками возбуждения: 1) независимой, 2) параллельной и 3) последовательной (рисунок 1б), намагничивающая сила которой, направлена навстречу намагничивающей силе $F_1 + F_2$ первых двух обмоток. Такие генераторы предложены инженером Ц. Кремером в 1909 году. Генераторы с тремя обмотками возбуждения в настоящее время применяются в мощных экскаваторах с электрическим приводом, на тепловозах для питания тяговых двигателей, а также в ряде других случаев.

1.2 Генераторы с расщепленными полюсами

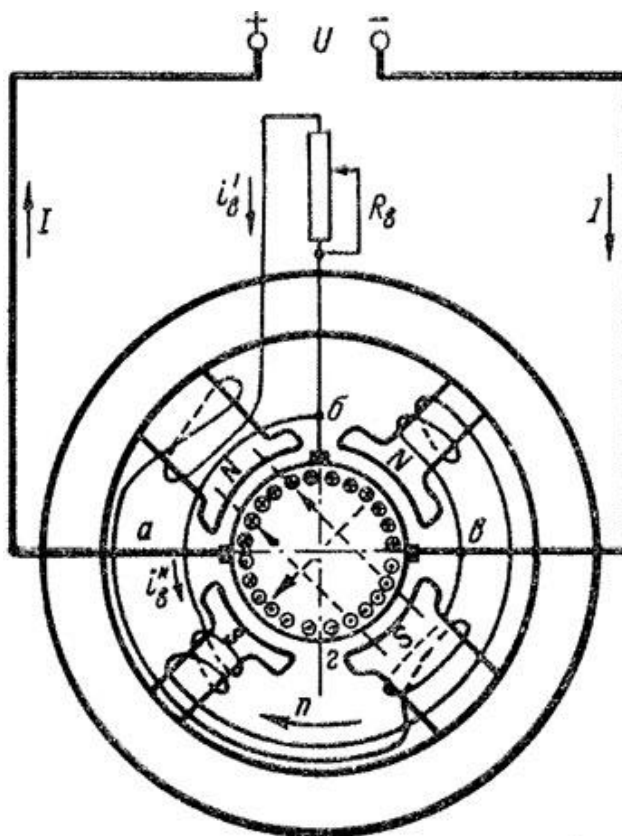


Рисунок 1.2 Сварочный генератор с расщепленными полюсами

Генераторы с расщепленными полюсами также имеют круто падающую внешнюю характеристику. На рисунке 1.2 изображен сварочный двухполюсный генератор, в котором каждый из полюсов N и S расщеплен на две части: с сердечниками нормального и уменьшенного сечения. Машина имеет две обмотки возбуждения, одна из которых расположена на широких сердечниках, а другая — на узких. Узкие сердечники насыщены сильно, а широкие — слабо.

Якорь генератора (рисунок 1.2) можно разбить на четыре сектора. Сектор ag и $бв$ создают намагничивающую силу реакции якоря, которая направлена по оси широких сердечников полюсов и размагничивает их (смотрите рисунок 1.2, где штриховые линии изображают магнитные линии потока реакции якоря). Поскольку эти сердечники слабо насыщены, то их поток с увеличением I_a значительно уменьшается, а при больших значениях I_a даже изменяет направление. Секторы ab и $гв$ создают намагничивающую силу реакции якоря, которая направлена по оси узких сердечников и намагничивает их. Однако вследствие сильного насыщения этих сердечников поток в них остается практически постоянным. В результате суммарный поток сердечников полюсов $N - N$ и сердечников полюсов $S - S$ с увеличением I_a быстро уменьшается, вместе с тем резко падает также напряжение машины U , снимаемое с главных щеток a и $в$.

Напряжение между главной щеткой $в$ и вспомогательной, или "третьей", щеткой $б$ остается практически постоянным, так как индуцируется потоком узких полюсных сердечников, и используется для питания обмоток возбужде-

ния. Ток обмоток широких сердечников регулируется сопротивлением R_B , и при разных положениях реостата получаются внешние характеристики, показанные на рисунке 1.3.

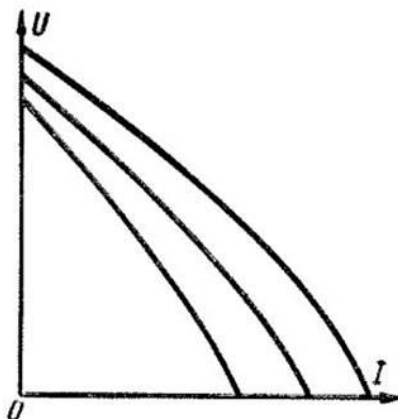


Рисунок 1.3 Внешние характеристики генератора по схеме рисунка 2

В СССР с расщепленными полюсами изготавливались сварочные генераторы ПС с $U_n = 35$ В (напряжение холостого хода до 80 В) и на ток до 500 А. Генераторы имели также добавочные полюсы, расположенные между сердечниками главных полюсов N и S .

1.3 Генераторы поперечного поля

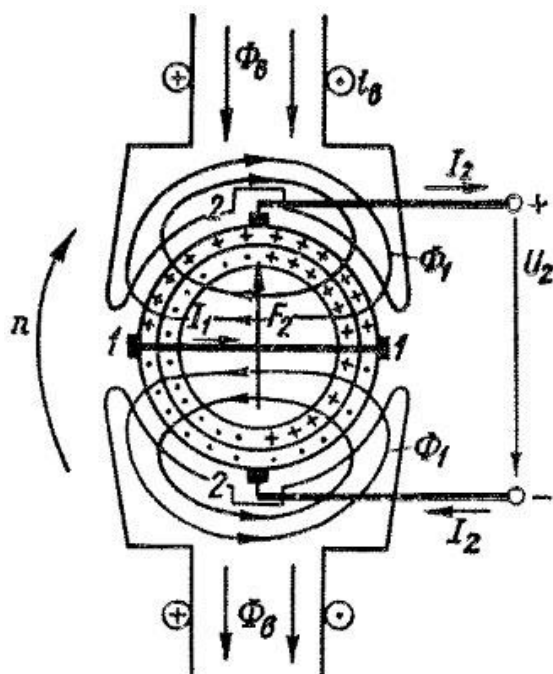


Рисунок 1.4 Устройство генератора поперечного поля

Такие генераторы впервые были предложены немецким инженером Э. Розенбергом (1904 году). В настоящее время они применяются главным образом для питания электрооборудования пассажирских вагонов железных дорог и работают параллельно с аккумуляторной батареей. Эти генераторы приводятся

в движение от оси вагона и в широком диапазоне изменения n дают $U = \text{const}$.

Устройство двухполюсного генератора поперечного поля схематически показано на рисунке 1.4. Кроме щеток 1 - 1, расположенных на геометрической нейтрали полюсов, машина имеет также щетки 2 - 2, сдвинутые от первых на 90° . Щетки 1 - 1 замкнуты накоротко, а щетки 2 - 2, соединяются с выводными зажимами.

Поток возбуждения полюсов Φ_v индуцирует электродвижущую силу E_1 в цепи короткозамкнутых щеток 1 - 1, но не индуцирует электродвижущую силу в цепи щеток 2 - 2. Ток

$$I_1 = E_1 / R_a \quad (1)$$

создает поперечный поток реакции якоря Φ_1 , замыкающийся через широкие наконечники полюсов. Этот поток индуцирует в цепи щеток 2 - 2 электродвижущую силу E_2 , которая вызывает в цепи нагрузки ток I_2 . Одновременно ток I_2 создает намагничивающую силу реакции якоря F_2 , направленную по продольной оси полюсов и уменьшающую поток возбуждения. Такое действие F_2 и обуславливает получение $U = \text{const}$ при изменении n . На якоре (рисунок 1.4) во внешнем кольце показаны направления тока I_1 , а во внутреннем - направления тока I_2 . В проводниках одних секторов якоря существуют токи $I_1 + I_2$, а в проводниках других секторов - токи $I_1 - I_2$.

Зависимости I_1 , I_2 и U_2 от n изображены на рисунке 5.

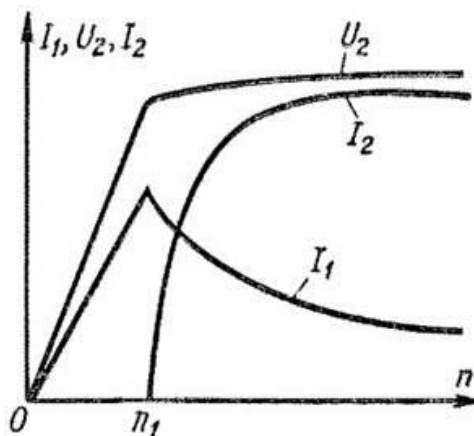


Рисунок 1.5 Характеристики генератора поперечного поля

Генератор возбуждается от аккумуляторной батареи и с $n=0$ до $n=n_1$ работает на холостом ходу ($I_2 = 0$). При этом I_1 и $U_2 = E_2$ растут пропорционально n . При $n=n_1$ напряжение $U_2 = E_2$ сравнивается с напряжением аккумуляторной батареи и автомат включает генератор на параллельную работу с батареей. С дальнейшим увеличением E_2 при $n > n_1$ возникает ток нагрузки I_2 и намагничивающая сила реакции якоря F_2 . Под действием этой намагничивающей силы Φ_v начинает уменьшаться, вследствие чего уменьшаются также E_1, I_1 и Φ_1 . Однако электродвижущая сила $E_2 = c_e \omega \Phi_1 I_n$ на щетках 2 - 2, а также напряжение $U_2 = E_2 - R_a I_2$ продолжают несколько расти. Начиная с некоторой скорости, U_2 и I_2 остаются практически постоянными.

Советский инженер Л. Рашковский предложил помещать на полюсах генератора поперечного поля последовательную обмотку возбуждения, которая включается в цепь тока I_2 и компенсирует основную часть намагничивающей силы реакции якоря от этого тока. Такая компенсационная обмотка позволяет облегчить обмотку возбуждения и уменьшить ее мощность, а также улучшить характеристики генератора.

Как нетрудно заметить, полярность генератора не зависит от направления вращения, что в случае параллельной работы с батареей является ценным свойством генератора.

Вагонные генераторы рассматриваемого типа строятся на напряжение $U_2 = 50$ В и на мощность до $P = 5$ кВт. Однако в последнее время вместо таких генераторов применяют генераторы переменного тока с полупроводниковыми выпрямителями, преимущество которых заключается в отсутствии коллектора.

1.4 Тахогенератор постоянного тока

Тахогенераторы постоянного тока служат для измерения частоты вращения по значению выходного напряжения, а также для получения электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения вала в схемах автоматического регулирования. Тахогенератор постоянного тока представляет собой генератор малой мощности с электромагнитным независимым возбуждением (рисунок 1.6а) или с возбуждением постоянными магнитами.

Ввиду того что при постоянном токе возбуждения $I_g = const$ магнитный поток Φ практически не зависит от нагрузки, выходная ЭДС тахогенератора $E_{вых}$ прямо пропорциональна частоте вращения:

$$E_{вых} = c_e \Phi n = c_e^1 n, \quad (2)$$

где $c_e^1 = c_e \Phi = const$.

Формула (2) справедлива и для тахогенератора с возбуждением постоянными магнитами, где $\Phi = const$. Для измерения частоты вращения тахогенератором вал последнего механически соединяют с валом механизма, частоту вращения которого требуется измерить. На выводы тахогенератора подключают измерительный прибор со шкалой, градуированной в единицах частоты вращения.

Точность работы тахогенератора определяется его *выходной характеристикой*, представляющей собой зависимость выходного напряжения от частоты вращения n при неизменном значении сопротивления нагрузки. Наиболее точная работа тахогенератора соответствует прямолинейной выходной характеристике (рисунок 1.6б, прямая 1).

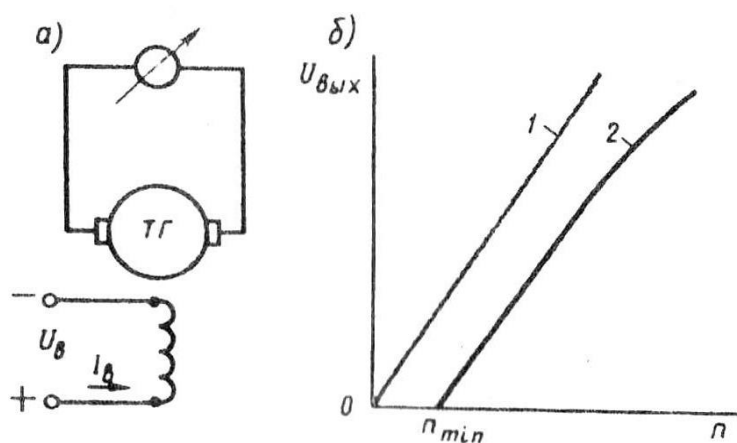


Рисунок 1.6 Принципиальная схема (а), выходная характеристика (б) тахогенератора постоянного тока

Однако в реальных тахогенераторах выходная характеристика не прямолинейна (график 2) и к тому же она выходит не из начала осей координат. Основная причина криволинейности характеристики – реакция якоря, поэтому уменьшению криволинейности этой характеристики способствует включение на выход тахогенератора приборов с большим внутренним сопротивлением, так как при уменьшении тока якоря ослабляется действие реакции якоря. В современных тахогенераторах отклонение выходной характеристики от прямолинейной составляет от 0,5 до 3%.

Падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$ создает в тахогенераторе зону *нечувствительности*. Это диапазон частот вращения от 0 до n_{min} , в котором напряжение на выходе генератора равно нулю. Граница зоны нечувствительности определяется выражением

$$n_{min} = \Delta U_{щ} / (c_e \Phi). \quad (3)$$

Широкое применение получили тахогенераторы постоянного тока, возбуждаемые постоянными магнитами. Эти тахогенераторы не имеют обмотки возбуждения, и поэтому они проще по конструкции и имеют меньшие габариты.

1.5 Бесконтактный двигатель постоянного тока

С целью улучшения свойств двигателей постоянного тока были созданы двигатели с бесконтактным коммутатором, называемые бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ). Отличие БДПТ от коллекторных двигателей традиционной конструкции состоит в том, что у них щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором (инвертором), управляемым сигналами, поступающими с бесконтактного датчика положения ротора. Рабочая обмотка двигателя – обмотка якоря – расположена на сердечнике статора, а постоянный магнит – на роторе.

Вал двигателя D (рисунок 1.7а) механически соединен с датчиком поло-

жения ротора (ДПР), сигнал от которого поступает в блок коммутатора (БК). Подключение секций обмотки якоря к источнику постоянного тока происходит через элементы блока коммутатора (БК). Назначение ДПР – выдавать управляющий сигнал в блок коммутатора в соответствии с положением полюсов постоянного магнита относительно секций обмотки якоря.

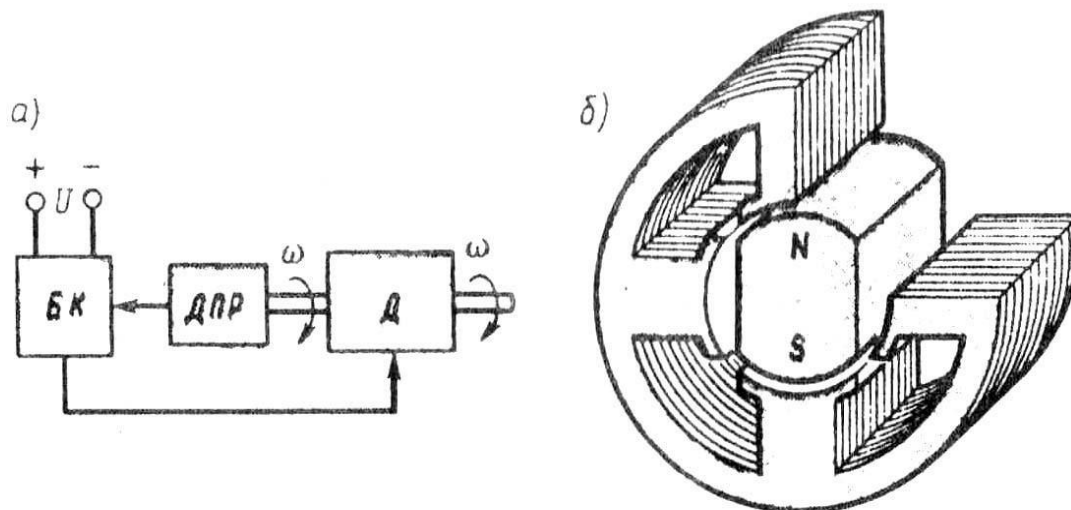


Рисунок 1.7 Бесконтактный двигатель постоянного тока:
а – блок-схема, б – магнитная система

В качестве датчиков положения ротора применяют чувствительные различные бесконтактные элементы с минимальными размерами и потребляемой мощностью и большой кратностью минимального и максимального сигналов, чтобы не вызывать нарушений в работе блока коммутатора. Чувствительные элементы ДПР должны надежно работать при внешних воздействиях (температура, влажность, вибрации и т. п.), на которые рассчитан двигатель. Такие свойства присущи ряду чувствительных элементов (датчиков): индуктивных, трансформаторных, магнитодиодов и т. п. Наиболее целесообразно использовать датчики ЭДС Холла (рисунок 1.8), представляющие собой тонкую полупроводниковую пластину с нанесенными на ней контактными площадками, к которым припаяны выводы 1 - 2, подключенные к источнику напряжения U_1 , и выводы 3 - 4, с которых снимают выходной сигнал U_2 . Если в цепи 1 - 2 проходит ток I , а датчик находится в магнитном поле, вектор индукции B которого перпендикулярен плоскости пластины датчика, то в датчике наводится ЭДС и на выводах 3 - 4 появляется напряжение U_2 . Значение ЭДС зависит от тока I и магнитной индукции B , а полярность - от направления тока I в цепи 1 - 2 и направления вектора магнитной индукции B .

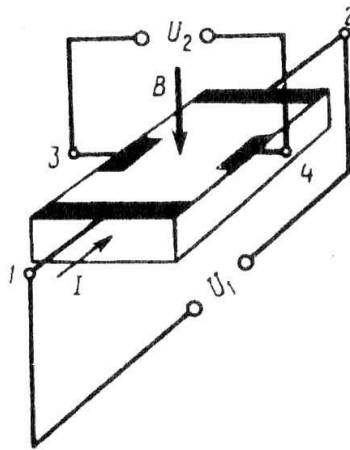


Рисунок 1.8 Датчик ЭДС Холла

Рассмотрим работу бесконтактного двигателя постоянного тока, для управления которым применяют датчики Холла и коммутатор, выполненный на транзисторах $VT1-VT4$ (рисунок 1.9). Четыре обмотки (фазы) двигателя $w_1 - w_4$ расположены на явно выраженных полюсах шихтованного сердечника якоря (см. рисунок 1.9б). Датчики Холла $ДХ1$ и $ДХ2$ установлены в пазах полюсных наконечников двух смежных полюсов. Силовые транзисторы $VT1-VT4$ работают в релейном (ключевом) режиме (рисунок 1.9). Сигнал на открытие транзистора поступает от соответствующего датчика Холла (датчика положения ротора). Питание датчиков Холла (выводы 1-2) осуществляется от источника напряжением U_1 .

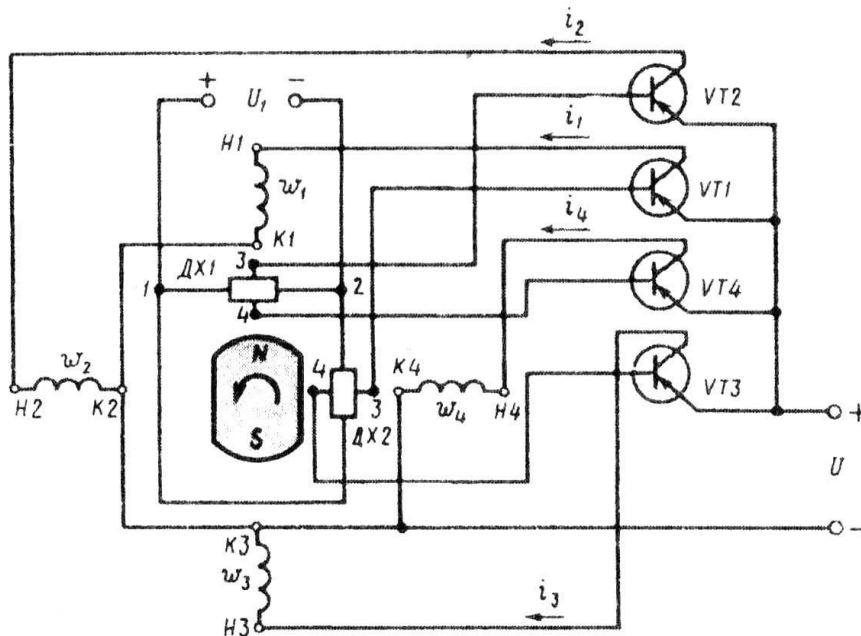


Рисунок 1.9 Принципиальная схема БДПТ

Каждая обмотка (фаза) выполнена из двух катушек, расположенных на противоположных полюсах сердечника статора и соединенных последовательно (рисунок 1.10). Если по какой-либо из обмоток (фаз) статора проходит ток от начала $H1-H4$ к концу $K1-K4$, то полюсы сердечника статора приобретают полярность соответственно S и N .

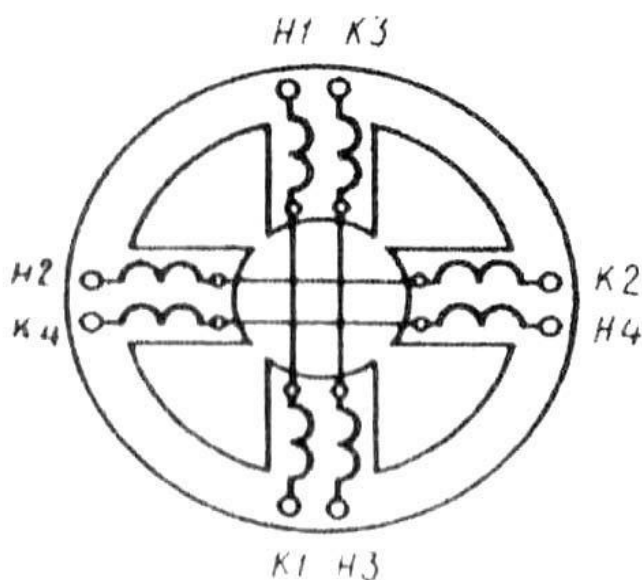


Рисунок 1.10 Расположение обмоток фаз на полюсах статора БДПТ

При положении ротора, показанном на рисунке 1.10, в зоне магнитного полюса N находится датчик $ДХ1$. При этом на выходе датчика появляется сигнал, при котором транзистор $VT2$ переходит в открытое состояние. В обмотке (фаза) статора w_2 появляется ток i_2 , протекающий от $H2$ к $K2$. При этом полюсы статора 2 и 4 приобретают полярность S и N (рисунок 1.11а). В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора (постоянного магнита) появляется электромагнитный момент M , вращающий ротор. После поворота ротора относительно оси полюсов статора 1-3 на некоторый угол α против часовой стрелки датчик $ДХ2$ окажется в зоне магнитного полюса ротора S , при этом по сигналу с датчика $ДХ2$ включается транзистор $VT3$. В фазной катушке w_3 возникает ток i_3 и полюсы 3 и 1 приобретают полярность S и N . При этом магнитный поток статора Φ создается совместным действием МДС обмоток фаз w_2 и w_3 . Вектор этого потока повернут относительно оси 2-4 на угол 45° (рис. 30.8, б). Ротор, продолжая вращение, занимает положение по оси полюсов статора 2-4. При этом датчик $ДХ1$ попадает в межполюсное пространство ротора, а датчик $ДХ2$ останется в зоне полюса S ротора. В результате транзистор $VT2$ закрывается, транзистор $VT3$ останется открытым и магнитный поток Φ , создаваемый МДС обмотки фазы w_3 , поворачивается относительно оси полюсов 2-4 еще на 45° (рис. 30.8, в). После того как ось вращающегося ротора пересечет ось полюсов статора 2-4, датчики $ДХ1$ и $ДХ2$ окажутся в зоне полюса ротора S , что приведет к включению транзисторов $VT3$ и $VT4$. Дальнейшую работу элементов схемы БДПТ (рисунок 1.11) до завершения вектором потока Φ одного оборота проследим по таблице 1.1 и рисунку 1.11а - з.

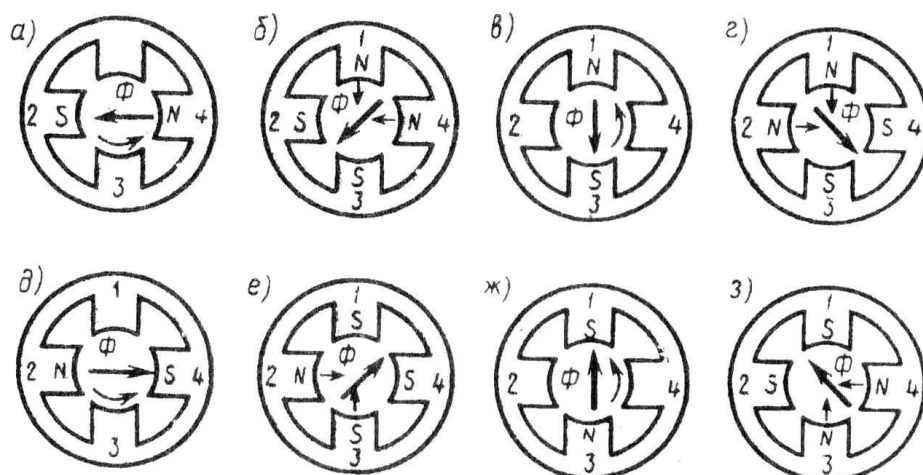


Рисунок 1.11 Магнитное поле статора в четырехполюсном БДПТ

На рисунке 1.12 показано устройство рассмотренного БДПТ. Датчики Холла 3 размещены в специальных пазах полюсных наконечников 1 сердечника статора.

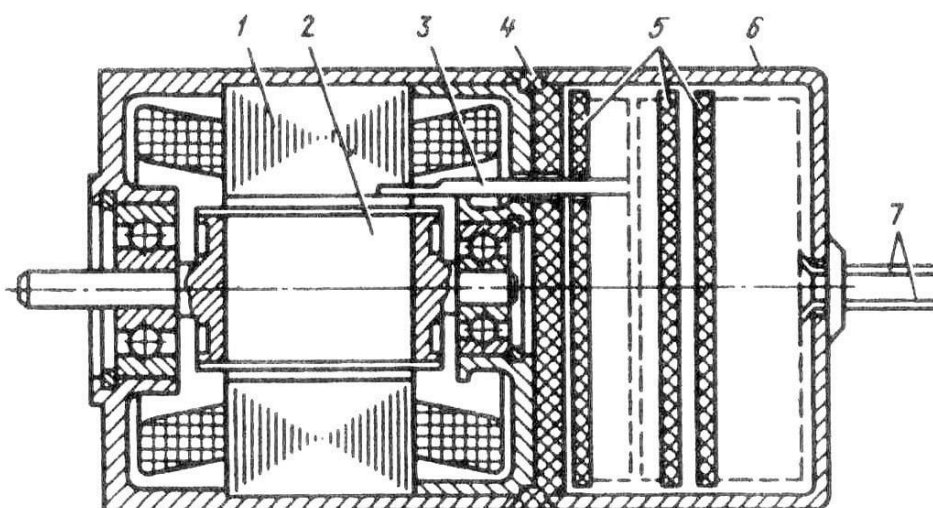


Рисунок 1.12 Устройство БДПТ

Постоянный магнит 2 не имеет центрального отверстия для посадки на вал, он закладывается в тонкостенную гильзу и закрывается привариваемыми фланцами двух полуосей. Такая конструкция ротора позволяет избежать выполнения центрального отверстия в постоянном магните, что часто является причиной брака (трещины, сколы и т. п.). Блок коммутатора (БК) расположен на панелях 5, отделен от двигателя перегородкой 4 и закрыт металлическим колпаком 6, через который выведены провода 7 для подключения двигателя в сети постоянного тока. Подобная конструкция применена в БДПТ полезной мощностью от 1 до 120 Вт.

Изменение направления вращения (реверс) двигателя осуществляется изменением полярности напряжения U_1 в токовой цепи датчиков Холла. Изменение полярности напряжения U_1 на входе двигателя недопустимо, так как при этом прекращается работа блока коммутатора.

Таблица 1.1

Порядок коммутации в ДДПТ

Позиция на рис. 1.11	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>a</i>
Открыты транзисторы	<i>VT2</i>	<i>VT2,VT3</i>	<i>VT3</i>	<i>VT3,VT4</i>	<i>VT4</i>	<i>VT4,VT1</i>	<i>VT1</i>	<i>VT1,VT2</i>	<i>VT2</i>
Ток <i>i</i> проходит по фазным катушкам	w_2	w_2, w_3	w_3	w_3, w_4	w_4	w_1, w_4	w_1	w_1, w_2	w_2
Угол поворота вектора потока статора, град	0	45	90	135	180	225	270	315	360

Коэффициент полезного действия БДПТ по сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока выше, что объясняется отсутствием щеточно-коллекторного узла, а значит, электрических потерь в щеточном контакте и механических потерь в коллекторе.

К достоинствам БДПТ относятся также высокая надежность и долговечность, что объясняется отсутствием у них щеточно-коллекторного узла, т. е. их бесконтактностью. Двигатели могут работать в условиях широкого диапазона температур окружающей среды, в вакууме, в средах с большой влажностью и т. п., где применение коллекторных двигателей недопустимо из-за неработоспособности щеточно-коллекторного узла.

Недостаток БДПТ – повышенная стоимость, обусловленная наличием полупроводникового блока коммутатора, чувствительных элементов (датчиков ЭДС Холла) и постоянного магнита.

1.6 Исполнительные двигатели постоянного тока

Исполнительные двигатели постоянного тока, так же как исполнительные асинхронные двигатели, применяются в системах автоматики для преобразования электрического сигнала в механическое перемещение. Помимо обычных требований, предъявляемых к электродвигателям общего назначения, к исполнительным двигателям предъявляется ряд специфических требований, из которых основными являются отсутствие самохода и малоинерционность.

Почти все исполнительные двигатели (исключение составляют лишь двигатели с постоянными магнитами) имеют две обмотки. Одна из них постоянно подключена к сети и называется *обмоткой возбуждения*, на другую – *обмотку управления* электрический сигнал подается лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение вала. От напряжения управления зависят частота вращения и вращающий момент исполнительного двигателя, а следовательно, и развиваемая им механическая мощность.

Исполнительные двигатели постоянного тока по конструкции отличаются

от двигателей постоянного тока общего назначения только тем, что имеют шихтованные (набранные из листов электротехнической стали) якорь, станину и полюсы, что необходимо для работы исполнительных двигателей в переходных режимах. Магнитная цепь исполнительных двигателей не насыщена, поэтому реакция якоря практически не влияет на их рабочие характеристики.

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока в настоящее время используют чаще всего двигатели с независимым возбуждением, реже – двигатели с постоянными магнитами. У двигателей с независимым возбуждением в качестве обмотки управления используют либо обмотку якоря – двигатели с якорным управлением, либо обмотку полюсов – двигатели с полюсным управлением.

У исполнительных двигателей с якорным управлением обмоткой возбуждения является обмотка полюсов, а обмоткой управления – обмотка якоря (рисунок 1.13а). Обмотку возбуждения подключают к сети с постоянным напряжением U_B на все время работы автоматического устройства. На обмотку управления подают сигнал (напряжение управления) лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение якоря двигателя. От напряжения управления зависят вращающий момент и частота вращения двигателя. При изменении полярности напряжения управления меняется направление вращения якоря двигателя.

У исполнительных двигателей с полюсным управлением обмоткой управления является обмотка полюсов, а обмоткой возбуждения – обмотка якоря (рисунок 1.13б). Якорь двигателя постоянно подключен к сети с напряжением $U_B = const$. Для ограничения тока иногда последовательно с якорем включают добавочное (балластное) сопротивление R_D . На обмотку полюсов напряжение управления U_y , (сигнал) подают лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение якоря.

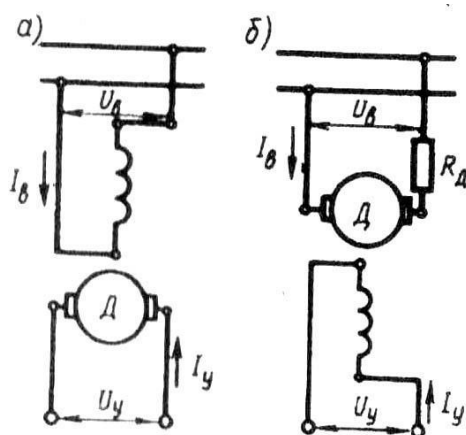


Рисунок 1.13 Схема включения исполнительных двигателей постоянного тока

Исполнительные двигатели постоянного тока обычной конструкции имеют существенный недостаток – замедленность переходных процессов, т. е. отсутствие малоинерционности. Объясняется это в основном двумя причинами: наличием массивного якоря со стальным сердечником, обладающим значитель-

ным моментом инерции, и значительной индуктивностью L_a обмотки якоря, уложенной в пазы сердечника якоря. Последняя причина способствует увеличению электромагнитной постоянной времени $T = L_a / \Sigma r$. Указанные недостатки отсутствуют в двигателях с гладким (полым) якорем (рисунок 1.14). Станина 1 и полюсы 3 этого двигателя обычные. Возбуждение двигателя осуществляется либо с помощью обмотки возбуждения 2, либо постоянными магнитами.

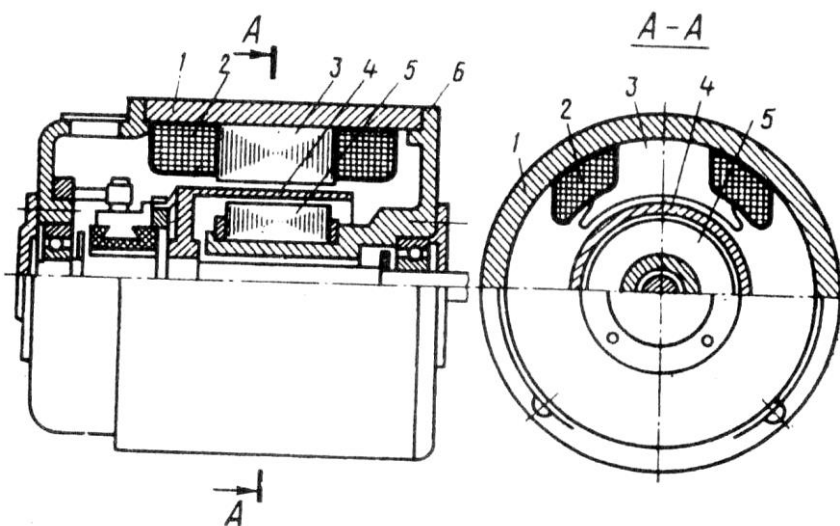


Рисунок 1.14 Малоинерционный исполнительный двигатель постоянного тока с полым якорем

Для уменьшения момента инерции якоря его обмотка отделена от массивного ферромагнитного сердечника, последний выполнен неподвижным (внутренний статор 5) и расположен на цилиндрическом выступе подшипникового щита 6.

Обмотка якоря в процессе изготовления укладывается на цилиндрический каркас, а затем заливается пластмассой. Готовый якорь 4 представляет собой полый стакан, состоящий из проводников обмотки, связанных воедино пластмассой. Концы секций обмотки, как и в обычном двигателе, соединяются с пластинами коллектора, который является частью дна полого стакана якоря 4. Вращающийся узел двигателя с гладким якорем состоит из вала, коллектора и обмотки якоря, залитой пластмассой.

Момент инерции полого якоря значительно меньше момента инерции обычного якоря, что обеспечивает хорошее быстродействие двигателя. Кроме того, индуктивность обмотки якоря снижается, что также способствует повышению быстродействия двигателя. К тому же снижение индуктивности обмотки улучшает коммутацию двигателя за счет уменьшения реактивной ЭДС.

Недостаток рассмотренного малоинерционного двигателя с полым якорем – наличие большого немагнитного промежутка между полюсами статора и неподвижным ферромагнитным сердечником – внутренним статором. Этот промежуток складывается из двух воздушных зазоров и толщины стакана якоря (толщины слоя обмотки якоря). Наличие большого немагнитного промежутка на пути магнитного потока требует значительного увеличения МДС возбужде-

ния, что приводит, во-первых, к увеличению габаритов двигателя из-за увеличения объема обмотки возбуждения, а во-вторых, к росту потерь на нагрев обмотки возбуждения. Однако КПД двигателя с полым якорем вследствие отсутствия потерь в стали сердечника якоря практически находится на том же уровне, что и в обычных двигателях, а в случае применения для возбуждения постоянных моментов значительно превосходит КПД последних.

1.7 Контрольные вопросы

1. Устройство, принцип действия и назначение силового коллекторного микродвигателя постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением.

2. Устройство, принцип действия и назначение силового коллекторного микродвигателя постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением.

3. Устройство, принцип действия и назначение коллекторного микродвигателя постоянного тока с полым ротором и магнитоэлектрическим возбуждением.

4. Устройство, принцип действия и схема включения бесконтактного двигателя постоянного тока. Назначение коммутатора.

5. Устройство, принцип действия и назначение однофазного коллекторного двигателя.

6. Устройство, принцип действия и назначение универсального коллекторного двигателя.

7. Устройство и принцип действия исполнительного двигателя постоянного тока при якорном управлении. Механические характеристики.

8. Устройство и принцип действия исполнительного двигателя постоянного тока при полюсном управлении. Механические характеристики.

9. Устройство и принцип действия тахогенератора постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением. Схема включения, преимущества и недостатки).

10. Устройство и принцип действия тахогенератора постоянного тока с электромагнитным возбуждением. Схема включения (особо выделить преимущества и недостатки).

11. При каком способе управления исполнительными микродвигателями постоянного тока получается линейная регулировочная характеристика? Нелинейная? Почему?

12. Какой вид имеет механическая характеристика однофазного коллекторного микродвигателя? На каких механизмах используют такие двигатели?

13. Какие функции выполняет датчик положения ротора в бесконтактном микродвигателе постоянного тока? Какие могут быть датчики?

14. Какова кратность пускового тока у микродвигателя постоянного тока? А у обычного двигателя постоянного тока? Чем обусловлена разница?

15. Каков недостаток независимого электромагнитного возбуждения микродвигателя постоянного тока? Как его исключить?

16. Каково назначение компенсационной обмотки в ЭМУ?

17. Почему выходная характеристика тахогенератора криволинейна?

18. Будет ли работать БДПТ, если изменить полярность напряжения на его входе?

19. Объясните принцип якорного и полюсного способов управления исполнительными двигателями?

20. Каковы достоинства и недостатки малоинерционного двигателя постоянного тока?

2. Специальные асинхронные машины

Понятие «специальные машины» отражает специфику применения машин и связанные с этим конструктивные видоизменения. Применения асинхронных машин непрерывно расширяются, и их многообразие нельзя описать при ограниченном объеме книги, поэтому ниже рассматриваются лишь отдельные основные группы специальных асинхронных машин.

2.1 Асинхронные машины с двумя роторами

Одной из ветвей конструктивного видоизменения асинхронных машин являются машины с двумя роторами и в пределе машина с n роторами. На рисунке 2.1 показана конструкция машины с двумя роторами. Внутренний ротор 1 обычный с короткозамкнутой обмоткой, а второй ротор выполнен в виде полого цилиндра 2. Статор 3 – традиционной конструкции. Первый ротор может использоваться для вращения вентилятора, который обеспечивает отвод тепла, а двигатель с полым ротором используется как исполнительный двигатель. При регулировании напряжения частота вращения вентилятора изменяется мало, так как короткозамкнутый ротор имеет небольшое активное сопротивление, а частота вращения полого ротора при изменении напряжения изменяется в широких пределах.

Система уравнений, описывающая процессы преобразования энергии в машине с двумя роторами, состоит из двух уравнений движения и шести уравнений напряжения.

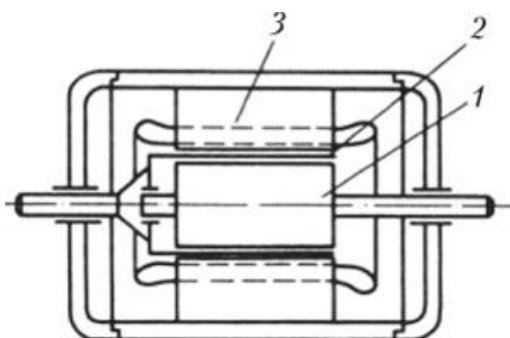


Рисунок 2.1 Асинхронный двигатель с двумя роторами

2.2 Магнитогидродинамические двигатели

Можно представить машину с тремя, четырьмя и n роторами и составить для них математическую модель. Математическая модель машины с несколькими или n роторами подходит для анализа процессов электромеханического преобразования энергии в машинах с жидким ротором. Машины с жидким ротором называются также магнитогидродинамическими машинами (МГД-машинами).

Магнитогидродинамические двигатели – насосы состоят из двух неподвижных статоров – одного с обмоткой и второго (внутреннего статора) без

обмотки. Между стальными сердечниками обычно имеются тепловые экраны, предохраняющие сердечники и обмотки от попадания жидкости и снижающие гидравлическое сопротивление. Вращающееся магнитное поле наводит в жидкости – роторе машины – токи, и электромагнитные силы увлекают жидкость. Чтобы получить осевые перемещения жидкости, один из статоров или оба имеют винтовую нарезку. Жидкий ротор, так же как и массивный ротор, можно разделить на n слоев. Каждый слой имеет механическую связь с другими слоями, и при вращении жидкости имеет место сложное взаимодействие между слоями, определяемое как магнитным полем, так и механическими воздействиями. В первом приближении n слоев жидкости можно заменить одним слоем и рассматривать процессы преобразования энергии, как в асинхронной машине с одним ротором.

Индукционные насосы находят применение в атомных реакторах для отбора тепла из радиоактивного контура. В качестве теплоносителя используются жидкие металлы и сплавы – натрий, калий и их соединения. Находят применение установки для перемешивания жидких металлов в металлургической промышленности и в литейном производстве.

В МГД-машинах жидкий ротор может быть заменен электропроводящим газом или плазмой. Асинхронные двигатели с газообразным ротором не нашли применения.

Как и все электрические машины, МГД-машины обратимы. Прогоняя жидкость или газ в магнитном поле, можно создать МГД-генераторы. В индукционных насосах, чтобы получить генераторный режим работы, достаточно прогонять жидкость со скоростью, большей скорости движения магнитного поля.

2.3 Линейные асинхронные двигатели

Линейные двигатели отличаются от обычных асинхронных двигателей тем, что они имеют разомкнутый магнитопровод, и круговое поле в воздушном зазоре линейных двигателей ни при каких условиях не может быть получено. Если в обычном асинхронном двигателе выполнить магнитопровод в виде дуги, получим машину с дуговым статором (рисунок 2.2а). Такие двигатели удобно встраиваются в механизм, они находят применение в приводах сепараторов и установках для перемешивания металла.

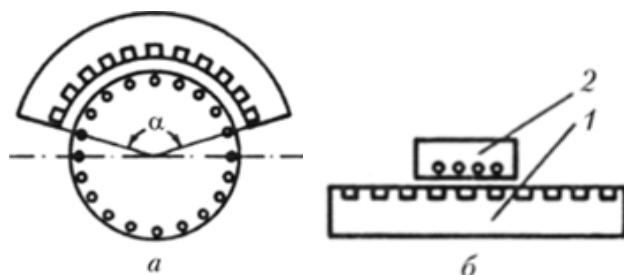


Рисунок 2.2 Двигатель с сегментным (дуговым) ротором (а) и линейный двигатель (б)

Принципиальным недостатком таких машин является появление в воздушном зазоре отраженных волн. Если в обычной электрической машине в воздушном зазоре образуются бегущие волны, которые укладываются по окружности статора целое число раз, то в машине с дуговым статором бегущая волна магнитного поля, отражаясь от краев магнитопровода, искажается, порождая бесчисленное число отраженных от обоих краев волн магнитного поля. Это явление принято называть краевым эффектом. Краевые эффекты ухудшают энергетические показатели машины, что ограничивает возможности применения таких машин.

Картина поля в воздушном зазоре асинхронного линейного двигателя определяется во многом длиной дуги статора a (см. рисунок 2.2а). При числе пар полюсов p и частоте сети f_1 частота вращения

$$n_1 = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{f_1}{p}. \quad (2.1)$$

При $a = 2\pi$, когда статор полностью охватывает ротор, получается обычная машина и синхронная частота вращения $n = f/p$.

Условия электромеханического преобразования энергии, близкие к условиям в машинах с дуговым статором, имеются в обычных асинхронных двигателях, когда используется только часть обмотки статора. Если в трехфазном двигателе отключить одну фазу, а две оставшиеся подключить к двухфазной системе напряжений, то вращающееся поле будет создано лишь на части статора, занятой обмоткой, обтекаемой токами. В этом случае появятся отраженные волны магнитного поля от участков статора, занятых секциями обмотки отключенной фазы. Хотя в этом случае нет явно выраженных границ магнитопровода, краевые эффекты проявляются почти так же, как в машинах с дуговым статором.

При проектировании электрических машин необходимо стремиться как к магнитной симметрии, так и к электрической симметрии, когда обмотки статора и ротора занимают всю зубцовую зону. Если в машине с дуговым статором увеличить радиус до бесконечности, получим линейный двигатель, показанный на рисунок 2.2б. В линейном двигателе может быть статор 1 длиннее ротора или наоборот. Ротор в линейных двигателях часто называют бегуном 2 .

В воздушном зазоре линейного двигателя, так же как и в двигателе с дуговым статором, за счет отраженных волн магнитное поле сильно искажается и не может быть круговым. В первом приближении магнитное поле в зазоре линейного двигателя можно рассматривать как эллиптическое поле с достаточно большой амплитудой обратного поля.

Конструкции линейных асинхронных двигателей весьма разнообразны. Бегун может выполняться в виде массивного ротора или с короткозамкнутой обмоткой, расположенной в пазах. Чтобы избежать магнитных тяжений, линейный двигатель может иметь ротор, расположенный между двумя статорами. Возможно применение обращенной конструкции, когда короткозамкнутый ротор неподвижен, а движется статор с фазной обмоткой.

Линейные двигатели находят применение для получения возвратно-поступательного движения. Однако в этом случае применение их целесообразно там, где допустимы низкие энергетические показатели. Коэффициент полезного действия в этом случае низкий из-за искажения поля в воздушном зазоре, а также из-за того, что при пусках и остановках двигателя большая часть энергии, забираемая из сети, преобразуется в тепло. Непрерывные переходные процессы при реверсировании двигателя резко снижают КПД и $\cos\varphi$.

Прежде чем пойти на применение линейного двигателя для получения возвратно-поступательного движения, необходимо сравнить его с обычным двигателем и механической системой для получения возвратно-поступательного движения.

Линейные двигатели могут использоваться для различных транспортных устройств. Одним из возможных вариантов является использование в качестве бегуна экипажа, перемещающегося вдоль полотна, представляющего собой статор длиной в десятки и сотни километров. При магнитном подвесе экипажа могут быть достигнуты скорости в несколько сотен километров в час. Однако такие установки требуют большие мощности, необходимые для высокоскоростного транспорта, что и осложняет их массовое применение. Большие перспективы, на наш взгляд, имеет грузовой транспорт с линейными двигателями при сравнительно низких скоростях движения.

Важным направлением применения линейных двигателей является использование их для ускорения или замедления больших масс движущихся объектов.

Линейные асинхронные двигатели используются в качестве насосов, когда ротором является жидкость. Плоские насосы имеют два статора с обмоткой 1, между которыми находится канал прямоугольного сечения 2 с жидким металлом (рисунок 2.3). Для линейных асинхронных двигателей с жидким ротором недостатки из-за турбулентного течения жидкости в канале только усугубляются.

Линейные электрические машины применяются практически только в двигательном режиме. В генераторном режиме находит применение МГД-генератор – электромеханический преобразователь энергии. МГД-генератор на выходе обычно дает постоянное напряжение и ток. Но при пульсациях магнитного поля или скорости плазмы на выходе можно получить переменное напряжение и ток. Такой генератор по принципу действия и конструкции близок к линейным двигателям и МГД-насосам.

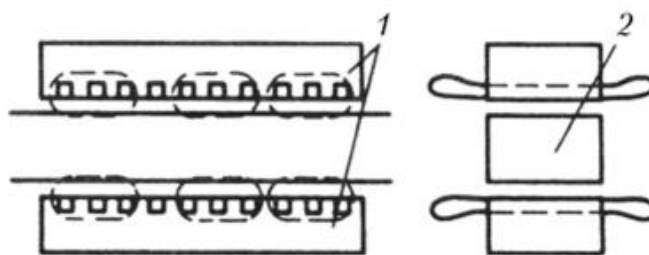


Рисунок 2.3 Насос, выполненный на базе линейного двигателя

2.4 Двухмерная и трехмерная электрические машины

Во всех машинах, которые рассматривались до сих пор, вращалась только одна часть машины – ротор. Однако можно сделать машину, у которой будут вращаться и ротор, и статор (рисунок 2.4).

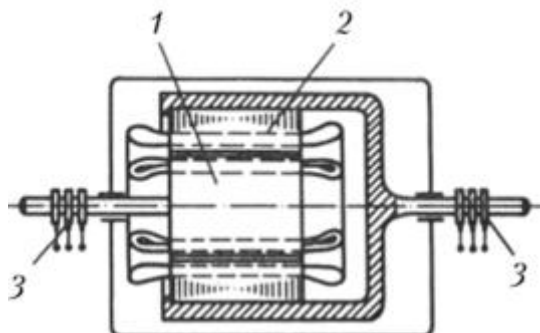


Рисунок 2.4 Двухмерная электрическая машина

Неподвижную часть принято называть статором, поэтому лучше говорить о машине с двумя роторами. В двухмерной машине или машине с двумя степенями свободы внутренний 1 и внешний роторы 2 вращаются относительно друг друга в противоположные стороны. На валу имеется двойной комплект контактных колец 3, через которые обеспечивается связь с вращающимися обмотками. Электромагнитный момент приложен к внутреннему и внешнему роторам. При этом угловые скорости внешнего $\omega_{вн}$ и внутреннего $\omega_{ем}$ роторов в сумме примерно равны синхронной угловой скорости ω_c .

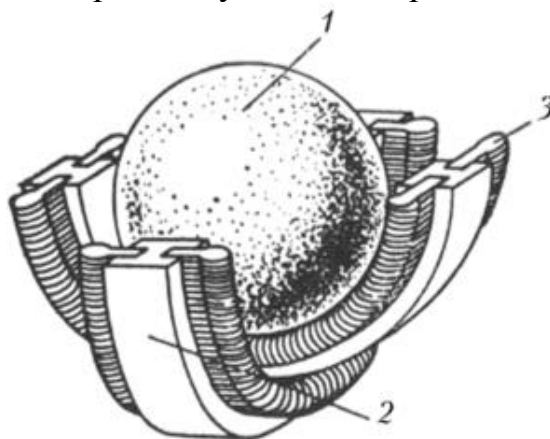


Рисунок 2.5 Трехмерный асинхронный двигатель

Трехмерная электрическая машина, показанная на рисунке 2.5, имеет два полукольцевых статора 2 и 3 и ротор 1 в виде шара. Ротор подвешен над статорами и в зависимости от моментов, создаваемых статорами, вращается в трехмерном пространстве.

Если в трехмерной машине (рисунок 2.5) вращаются и ротор, и статор, это будет шестимерная машина. Изучение процессов преобразования энергии в многомерных электрических машинах имеет важное значение для космической электромеханики, когда масса, с которой соединен статор электрической ма-

шины, соизмерима с массой ротора и вращение электрических машин влияет на ориентацию корабля.

Процессы электромеханического преобразования в многомерных электромеханических преобразователях описываются гораздо более сложными уравнениями. Уравнения машин с одной вращающейся частью являются частным случаем уравнений машин с несколькими степенями свободы. Подходить к уравнениям многомерных машин, наращивая их сложность и двигаясь от уравнений обычных одномерных машин, надо очень осторожно. Уже в двухмерной машине понятие скольжения — относительной частоты вращения — усложняется, а момент инерции влияет на значение установившейся частоты вращения. Многомерная электрическая машина с n степенями свободы не может преобразовывать энергию в механическую и обратно, так как частота вращения в такой машине стремится к нулю, n -мерная машина работает как электромагнитный преобразователь.

2.5 Асинхронные двигатели с катящимся ротором

За счет несимметричного расположения ротора внутри статора можно получить электрические машины с новыми качествами.

В двигателях с катящимся ротором ротор с короткозамкнутой обмоткой расположен эксцентрично относительно статора (рисунок 2.6).

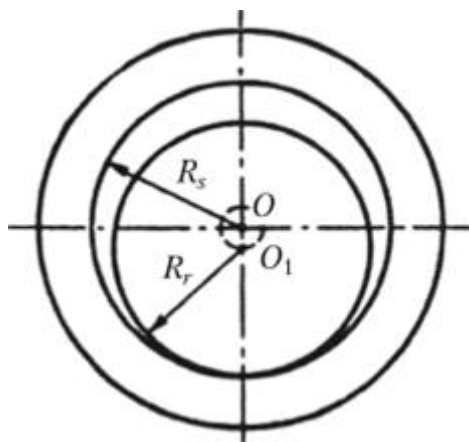


Рисунок 2.6 Двигатель с катящимся ротором

Вращающий момент в таком двигателе создается за счет сил одностороннего магнитного притяжения. Из-за большой несимметрии воздушного зазора электромагнитный момент формируется из произведений токов в обмотках статора и ротора, расположенных в разных осях и по одной оси, и уравнению момента обобщенной машины появляются произведения токов в обмотках статора $R_a i'_a$ и ротора, расположенных по одной оси.

Несимметричное магнитное поле поворачивает ротор в точку касания его со статором, а также будет перемещаться ось ротора по малой окружности, показанной на рисунке 2.6 штриховой линией. При этом частота вращения ротора зависит от разности длин окружности статора и ротора или разности радиусов статора R_s и ротора R_r :

$$\omega_p = 2\pi \frac{R_s - R_r}{R_r} \quad (2.2)$$

Или

$$n_2 = n_1 \frac{R_s - R_r}{R_r}. \quad (2.3)$$

Несимметрия магнитного поля в двигателях с катящимся ротором достигается не только за счет несимметрии зазора, но и за счет схем обмоток и схем питания. Недостатками таких двигателей являются большой шум, износ катков, по которым перемещается ротор, и необходимость в специальных передачах от вала двигателя к приводному механизму.

В двигателях с волновым ротором ротор деформируется под действием сил магнитного тяжения. При вращении ноля волны деформации перемещаются синхронно с полем и происходит обкатывание статора 2 ротором 1. При этом, когда поле сделает один оборот, ротор повернется вокруг своей оси на угол, равный разности длин окружностей статора и ротора (рисунок 2.7). По принципу действия этот двигатель аналогичен двигателю с катящимся ротором и ему присущи те же недостатки.

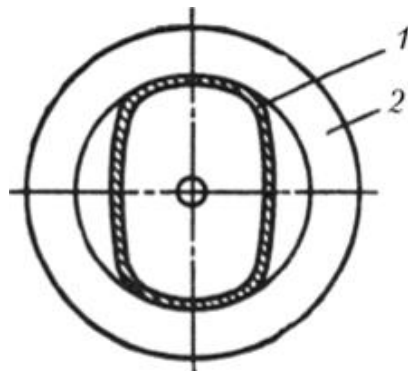


Рисунок 2.7 Двигатель с волновым ротором

2.6 Исполнительные асинхронные машины автоматических устройств

К машинам, применяемым в автоматических устройствах, в первую очередь относятся асинхронные исполнительные двигатели, которые должны обеспечивать высокий диапазон изменения частоты вращения при линейных механических и регулировочных характеристиках. Исполнительные двигатели должны иметь высокое быстродействие, большой пусковой момент, малую мощность управления, малый момент трения, а также не иметь самохода при уменьшении напряжения управления до нуля.

Этим противоречивым требованиям в основном удовлетворяют двухфазные асинхронные двигатели с полым ротором и двигатели с короткозамкнутой

обмоткой ротора с повышенным активным сопротивлением. Двигатели с полым ротором, рассмотренные ранее, выполняются на мощность до 30 Вт, а двигатели с короткозамкнутым ротором с повышенным сопротивлением – до 500 Вт. Исполнительные асинхронные двигатели могут изготавливаться на мощность и в несколько киловатт.

Исполнительные асинхронные двигатели на сотни ватт выполняются с шихтованным ротором, а короткозамкнутая обмотка заливается сплавами алюминия с повышенным сопротивлением или сваривается из латуни или бронзы. Используются также двигатели с массивным ротором, которые имеют худшие энергетические и массогабаритные показатели по сравнению с двигателями с шихтованным ротором. Двигатели с массивным ротором применяются в высокоскоростных приводах, в которых двигатели с короткозамкнутой обмоткой из-за недостаточной механической прочности применяться не могут.

В асинхронных исполнительных двигателях основной проблемой является отвод тепла, которое выделяется в машине при глубоком регулировании частоты вращения. Для лучшего охлаждения исполнительных двигателей применяются вентиляторы-наездники, частота вращения которых не зависит от частоты вращения исполнительного двигателя, используются также охлаждение водой и внутреннее испарительное охлаждение. В исполнительных микродвигателях интенсивный отвод тепла осуществляется также путем увеличения поверхности охлаждения.

Для плавного регулирования частоты вращения асинхронных исполнительных двигателей применяется два способа: частотный (изменение частоты напряжения) и изменением напряжения (изменение скольжения за счет амплитуды и фазы питающего напряжения). Наибольшее распространение получил второй способ, так как преобразователи частоты, несмотря на применение силовых полупроводниковых элементов, остаются громоздкими и дорогими. При регулировании частоты вращения исполнительных двигателей путем изменения напряжения применяют три способа управления: амплитудное, фазное и амплитудно-фазное. При амплитудном регулировании изменяется амплитуда подводимого к двигателю напряжения, при фазном – фаза напряжения, а при амплитудно-фазном изменяются и амплитуда, и фаза напряжения.

При изменении амплитуды или фазы питающего напряжения изменяется форма поля в воздушном зазоре из-за изменения амплитуд прямого и обратного полей. Таким образом, за счет изменения степени эллиптичности поля в воздушном зазоре осуществляется регулирование частоты вращения.

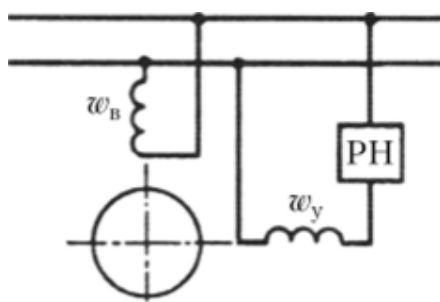


Рисунок 2.8 Схема управления двухфазным двигателем

В системах автоматического управления мощностью до 1 кВт обычно применяются двухфазные двигатели, когда одна обмотка (обмотка возбуждения w_e) подключена к сети, а обмотка управления w_y питается через регулятор напряжения РН (рисунок 2.8). В исполнительных двигателях мощностью больше 1 кВт используются трехфазные двигатели, когда каждая фаза обмотки через регулятор напряжения подключается к сети.

В последнее время в качестве управляющих элементов применяются регуляторы напряжения на тиристорах и транзисторах, находят также применение схемы на магнитных усилителях. Следует отметить, что управляющие элементы имеют большие габариты, так как они рассчитываются на полную или на часть мощности системы. Габариты и стоимость управляющих элементов возрастают в реверсивных системах, когда необходимо изменять направление вращения и регулировать частоту вращения в широких пределах.

Стремление снизить массу всей системы регулирования приводит к попытке объединить исполнительный двигатель и регулятор напряжения или преобразователь частоты в одном агрегате и за счет лучшего использования материалов получить общее снижение массы электромеханической системы.

Удачным совмещением исполнительного асинхронного двигателя и магнитных усилителей являются двигатели-усилители (рисунок 2.9). В двигателях-усилителях обмотки магнитных усилителей наматываются на спинку магнитопровода статора, а обмотки двигателя 1 и магнитного усилителя 2 укладываются в пазы. Обмотки переменного тока наматываются на спинку статора каждого пакета 3, а обмотки управления охватывают оба пакета. В ярме статора потоки магнитного усилителя и двигателя складываются. Сталь ярма статора является магнитопроводом магнитных усилителей и двигателя. Ротор 4 короткозамкнутый.

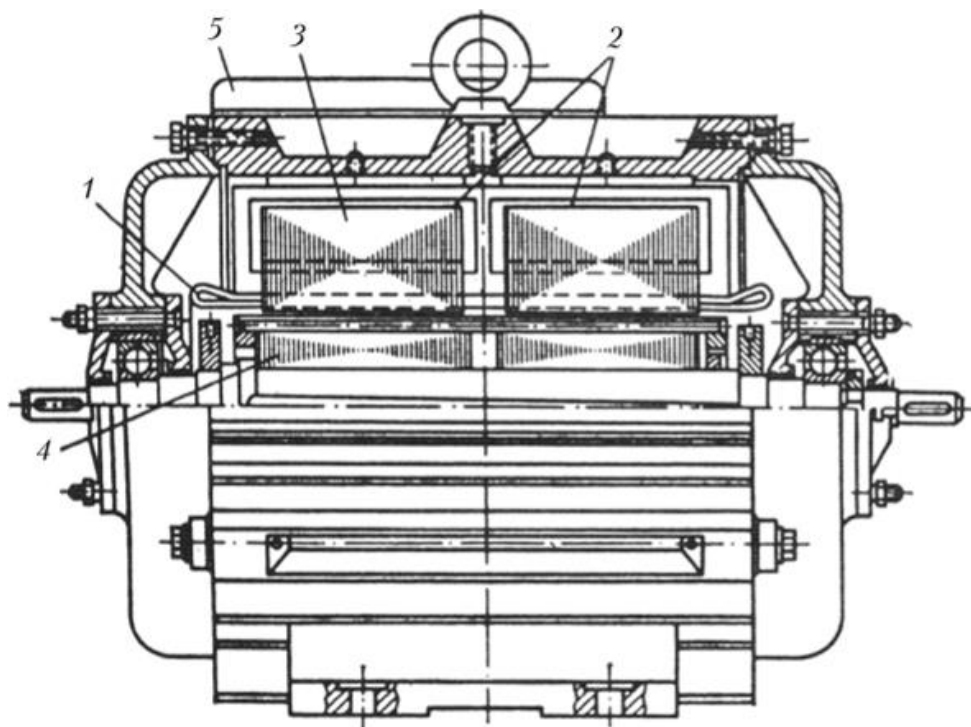


Рисунок 2.9 Асинхронный двигатель-усилитель

В коробке выводов 5 двигателя-усилителя помещаются диоды магнитных усилителей. В специальных машинах обычно коробки выводов имеют увеличенные размеры, так как в них располагаются различные элементы систем управления. Благодаря тому, что силовые обмотки магнитных усилителей соединены последовательно с обмоткой статора двигателя, при работе системы напряжение сети перераспределяется между магнитным усилителем и двигателем так, что суммарный магнитный поток практически не изменяется. Когда магнитные усилители не насыщены, их поток максимален, а при насыщении магнитных усилителей магнитный поток максимален в исполнительном двигателе. В промежуточных режимах поток перераспределяется между магнитными усилителями и двигателем. Двигатели-усилители обеспечивают снижение массы по сравнению с отдельной системой в 1,2-1,5 раза и, несмотря на применение регуляторов напряжения на тиристорах, являются наименее металлоемкими системами.

Для управления различными механизмами применяются микроЭВМ – микропроцессоры. Упрощение технологии изготовления и увеличение надежности микропроцессоров приводит к тому, что они встраиваются в электрические машины, чтобы получить простейшие самонастраивающиеся электромеханические системы.

В системах автоматического управления для приводных механизмов часто требуются низкие частоты вращения и большие моменты. Получить низкую частоту вращения, имея частоту сети 50 или 400 Гц, можно путем увеличения числа полюсов двигателя. Однако увеличение числа полюсов ограничивается технологическими причинами, так как нельзя из-за наклепа сделать ширину зубцов меньше примерно 1,2 мм, а диаметр двигателя, как правило, ограничен. Применение механических редукторов усложняет и снижает точность электромеханической системы.

Электрические машины позволяют получить электромагнитную редукцию частоты вращения. В основе электромагнитной редукции лежит использование пространственных гармоник и несимметрии воздушного зазора в двигателях с ротором индукторного типа, с катящимся или волновым ротором.

В редукторных двигателях в качестве основной гармоники используется 5-я или 7-я пространственная гармоника, которая имеет в 5-7 раз меньшие синхронные частоты вращения. При определенных соотношениях чисел зубцов на роторе и статоре и числа пар полюсов высшие пространственные гармоники имеют амплитуду большую, чем 1-я, и двигатель работает на высшей пространственной гармонике как на основной.

Недостатком редукторных двигателей являются низкий КПД и разброс характеристик, зависящий от технологии изготовления двигателя.

В настоящее время созданы электромеханические системы с исполнительными двигателями, обеспечивающие равномерную частоту вращения в один оборот и доли оборота в сутки.

Наибольшие трудности существуют при создании моментных асинхронных двигателей с большими моментами при, а также обеспечивающих глубокое регулирование частоты вращения.

В генераторном режиме асинхронные машины в системах автоматического управления широко используются в качестве тахогенераторов – датчиков частоты вращения и датчиков ускорения.

По своей конструкции асинхронные тахогенераторы ничем не отличаются от асинхронных двигателей с полым ротором. К одной из обмоток статора – обмотке возбуждения подводится переменное напряжение U . При вращении ротора со второй обмотки статора w_r , сдвинутой на электрический угол 90° по отношению к обмотке возбуждения, снимается напряжение U_r , которое пропорционально частоте вращения (рисунок 2.10).

При неподвижном роторе, когда $\omega_p = 0$, в обмотке w_β ЭДС не наводится и $U = 0$. При вращении в обмотке статора, расположенной под углом 90° к w_α , будет наводиться синусоидальное напряжение, пропорциональное скорости вращения.

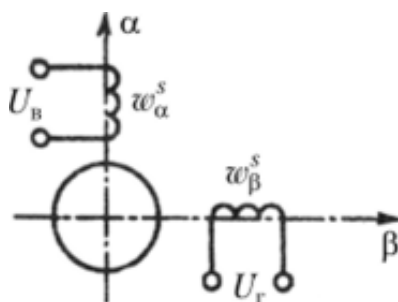


Рисунок 2.10 Асинхронный тахогенератор

Для тахогенератора важно, чтобы напряжение линейно зависело от ω_p , а его фаза и форма не изменились при изменении частоты вращения. Иными словами, амплитудные и фазовые погрешности в асинхронных тахогенераторах должны быть минимальными. Для уменьшения погрешностей следует делать ротор с повышенным сопротивлением, а нагрузка, подключаемая к напряжению должна быть высокоомной. При этом $U_2 \sim E_2$ и ток в выходной обмотке не влияют на характеристики асинхронного тахогенератора.

Одним из важных показателей тахогенератора является крутизна выходной характеристики

$$k = \frac{\Delta U_r}{\Delta n}, \quad (2.4)$$

где ΔU_r – изменение выходного напряжения; Δn – изменение частоты вращения.

Чем больше крутизна выходной характеристики, тем точнее будет работать система автоматического управления. Однако увеличение крутизны выходной характеристики без увеличения габаритов тахогенератора влечет увеличение амплитудной и фазовой погрешностей. Поэтому при проектировании тахогенераторов приходится увязывать крутизну выходной характеристики с погрешностями. У точных асинхронных тахогенераторов $k = 1-3$ мВ/(об/мин), а у тахогенераторов следящих систем $k = 6-10$ мВ/(об/мин).

При питании обмотки возбуждения постоянным током при постоянной частоте вращения напряжение U_r будет равно нулю, а при наличии ускорения dn/dt ЭДС на обмотке изменяется пропорционально ускорению. В этом режиме асинхронный тахогенератор является датчиком ускорения.

2.7 Электрические машины гироскопических систем

Особое место среди асинхронных машин, применяемых в системах автоматического управления, занимают электрические машины гироскопических систем. Они являются основой навигационных систем, с их помощью осуществляется стабилизация различных космических объектов.

Асинхронные гидродвигатели выполняются с короткозамкнутым ротором. Это — обращенные машины. Внешний ротор обеспечивает большой момент инерции, который определяет большую равномерность частоты вращения. Частота вращения в несколько десятков тысяч оборотов в минуту достигается за счет повышенной частоты напряжения питания - до 400-2000 Гц.

2.8 Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами.
2. Устройство и принцип действия исполнительного однофазного асинхронного двигателя. Способы и схемы управления двигателем.
3. Устройство и принцип действия однофазного асинхронного тахогенератора. Его применение в системах автоматизации производственных объектов.
4. Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя, предназначенного для гироскопа.
5. Особенности однофазного асинхронного двигателя гироскопической системы. Принцип действия.
6. Сравните по величине токи холостого хода обычного трехфазного асинхронного двигателя и однофазного. Чем обусловлено их различие?
7. Назначение второй обмотки на статоре однофазного асинхронного двигателя. Способы ее подключения к сети.
8. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя. Способы создания пускового момента на валу.
9. Способы увеличения пускового момента у однофазного асинхронного двигателя. Их влияние на механическую характеристику.
10. Почему асинхронные микродвигатели получили наибольшее распространение среди других?

2.9 Машины систем синхронной связи

В системах синхронной связи и для преобразования угла поворота в электрический сигнал применяются сельсины и поворотные (вращающиеся) трансформаторы.

Трехфазные сельсины конструктивно не отличаются от асинхронных машин с фазным ротором. В однофазных сельсинах имеется однофазная обмотка возбуждения и трехфазная обмотка синхронизации. Поворотные трансформаторы – двухфазные асинхронные двигатели с фазной обмоткой на роторе, выведенной на кольца. Так как сельсины и поворотные трансформаторы выполняют функции датчиков и приемников в устройствах автоматического управления, при проектировании их основное внимание должно быть уделено вопросам точности и надежности.

Сельсины применяют в системах синхронной связи двух видов: синхронного поворота (передачи угла) и синхронного вращения (электрического вала).

Системы передачи угла в свою очередь можно разделить на индикаторные системы синхронной связи, в которых момент сопротивления на ведомой оси мал или отсутствует, и на трансформаторные системы синхронной связи, когда на ведомой оси имеется момент сопротивления.

На рисунке 2.11 представлена схема индикаторной синхронной связи. Эта схема включает в себя два одинаковых однофазных сельсина и линию связи. Обмотки возбуждения сельсина-датчика w_{Ba} и сельсина-приемника w_{Bn} присоединены к одной сети, а концы фаз обмоток роторов сельсинов – обмотки синхронизации – через контактные кольца и линию связи соединены между собой. При повороте ротора сельсина-датчика на угол (α_d ротор сельсина-приемника стремится повернуться на такой же угол. При $\alpha_d \neq \alpha_n$ возникают токи I_A, I_B, I_C , создающие момент в сельсине-приемнике и сельсине-датчике.

Уравнительный ток в фазах обмотки синхронизации определяется как

$$I_y = \frac{\Delta E}{2z_\phi}, \quad (2.5)$$

где ΔE – ЭДС, определяемая углом поворота сельсина-датчика; z_ϕ – сопротивление фазы сельсина (для датчика и приемника одинаковые).

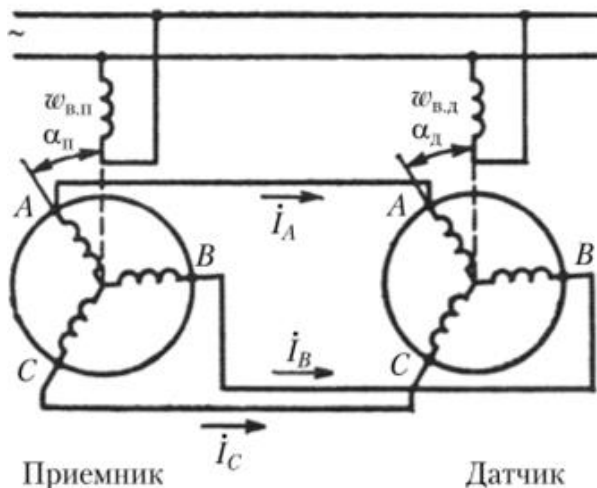


Рисунок 2.11 Схема индикаторной синхронной связи

В результате взаимодействия уравнительных токов с пульсирующим полем обмоток возбуждения сельсинов возникает синхронизирующий момент, который при изменении угла рассогласования изменяется по синусоидальному закону. Синхронизирующий момент приложен к сельсину-датчику и сельсину-приемнику.

Трансформаторная система связи состоит из сельсина- датчика, сельсина-приемника, линии связи, усилителя $У$ и исполнительного двигателя ИД (рисунок 2.12). Исполнительный двигатель соединен с нагрузочным механизмом, который имеет обратную механическую связь с сельсином-приемником. Обмотка возбуждения сельсина-датчика подключена к однофазной сети переменного тока и создает пульсирующее магнитное поле. Пульсирующее магнитное поле наводит в обмотке синхронизации датчика ЭДС, под действием которых в линии связи и обмотке синхронизации приемника постоянно протекают токи. Эти токи создают в сельсине-приемнике пульсирующее магнитное поле, направление которого зависит от взаимного расположения роторов приемника и датчика. Сцепляясь с обмоткой возбуждения приемника, это поле наводит ЭДС – выходное напряжение приемника. Последнее подается на усилитель, а затем на обмотку управления исполнительного двигателя, который обрабатывает заданный датчиком угол и возвращает ротор приемника в положение, при котором выходное напряжение становится равным нулю. Такое положение роторов сельсинов называется согласованным.

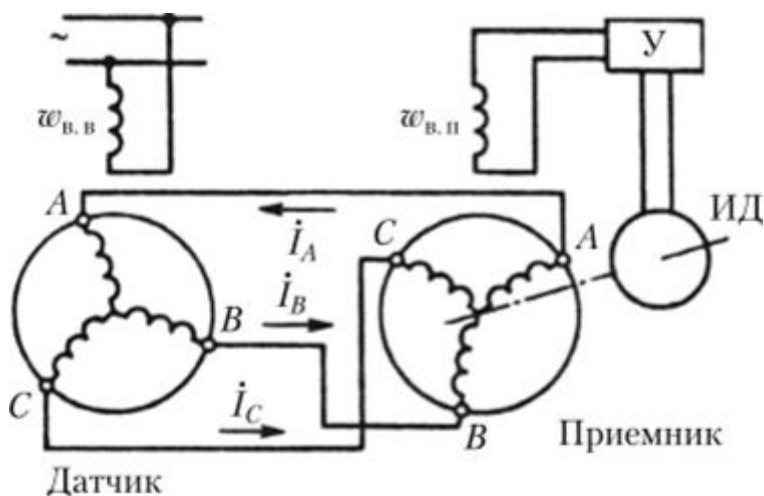


Рисунок 2.12 Трансформаторная система связи

В целях повышения качества работы системы синхронной связи часто сельсины выполняются без скользящих контактов (рисунок 2.13).

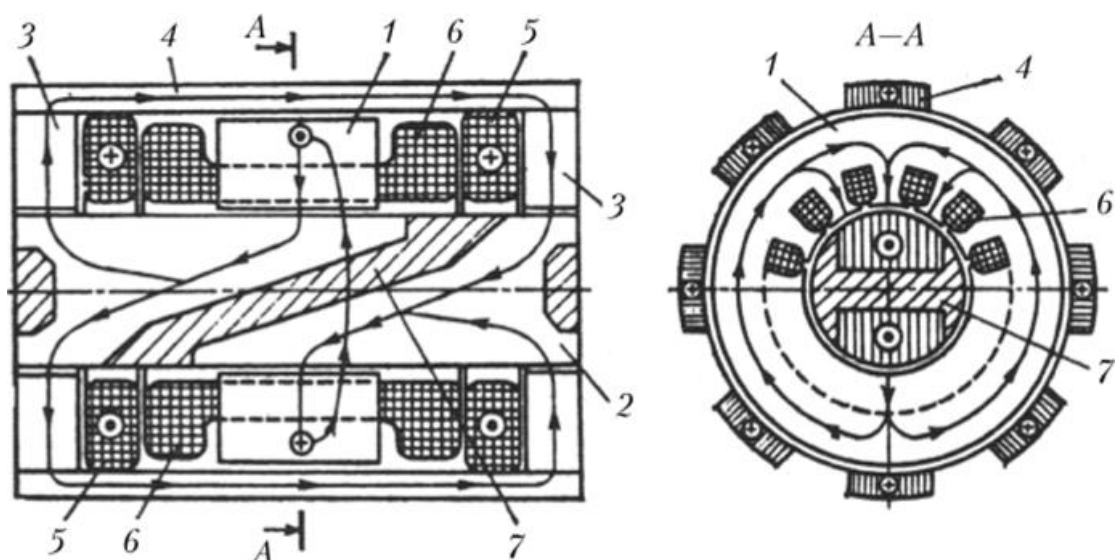


Рисунок 2.13 Бесконтактный сельсин

Статор 1 бесконтактного сельсина практически не отличается от статора обычной асинхронной машины. В пазах статора располагается соединенная в звезду трехфазная обмотка синхронизации 6. Ротор 2 бесконтактного сельсина двухполюсный и разделен немагнитным промежутком 7 на две части. Однофазная обмотка возбуждения 5 выполняется в виде двух неподвижных кольцевых катушек, расположенных между лобовыми частями обмотки статора и тороидами 3. Наружные цилиндрические поверхности тороидов связаны внешним магнитопроводом 4. Между внешним магнитопроводом и пакетом статора имеется немагнитный зазор. Путь магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения, показан на рисунке 2.13. Потокосцепление обмотки возбуждения с той или иной фазой обмотки синхронизации зависит от положения ротора, так же как и в контактном сельсине.

Главным требованием к сельсинам, работающим в системах синхронной связи, является точность, которая характеризуется погрешностью

$$\Delta\theta = \frac{\theta_{\max 1} + \theta_{\max 2}}{2}, \quad (2.6)$$

где $\theta_{\max 1}$, $\theta_{\max 2}$ — максимальные положительное и отрицательное отклонения ротора приемника от ротора датчика при повороте на один оборот.

В зависимости от значения $\Delta\theta$ сельсины делят на четыре класса точности. Для первого класса $\Delta\theta$ не более ± 30 с, а для четвертого — не более ± 90 с.

Системы синхронного вращения заменяют механическое соединение двух или нескольких синхронно перемещающихся механизмов. Электрический вал применяется там, где необходимо иметь синхронное вращение механизмов, находящихся на большом удалении друг от друга, а механическое соединение нежелательно или невозможно. Электрический вал состоит из асинхронных машин с фазным ротором, контактные кольца которых соединены между собой

(рисунок 2.14). При рассогласовании роторов двигателей, так же как и в схеме с сельсинами, возникают в статоре двигателей уравнивающие токи и электромагнитные моменты, возвращающие роторы в согласованное положение.

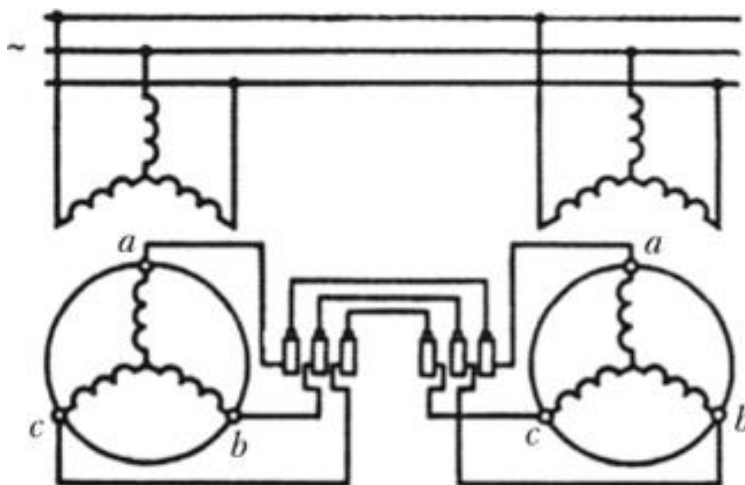


Рисунок 2.14 Электрический вал

Поворотные (вращающиеся) трансформаторы применяются в системах автоматического управления для преобразования механического перемещения – угла поворота ротора в выходное напряжение. Конструктивно они представляют собой двухфазные двигатели с двухфазной обмоткой ротора, выведенной на контактные кольца. Особенностью их конструкции является тщательное выполнение магнитной системы и обмоток, в результате чего уменьшается число пространственных гармоник, что обеспечивает высокую точность поворотных трансформаторов.

Последние используются в качестве синусных поворотных трансформаторов, в которых $u = L_i \sin \alpha$; синусно-косинусных поворотных трансформаторов, в которых $u_A = U_m \sin \alpha$, $U_B = U_m \cos \alpha$; линейных поворотных трансформаторов, в которых $U = k \alpha$.

Поворотные трансформаторы также используются как построители и фазовращатели. Они могут заменять сельсины. Благодаря тому, что поворотные трансформаторы – симметричные машины, в них достигается большая точность, чем в сельсинах.

Схема включения синусно-косинусного поворотного трансформатора показана на рисунке 2.15. При повороте ротора поворотного трансформатора в обмотке A наводится ЭДС, изменяющаяся по закону синуса, а в обмотке B – по закону косинуса.

Если в поворотном трансформаторе используется одна обмотка на роторе, такой поворотный трансформатор называется синусным поворотным трансформатором.

При определенном соединении обмоток и значении параметров обмоток можно в значительном диапазоне изменения угла получить линейное изменение $U = I(\alpha)$. Такие поворотные трансформаторы называются линейными поворотными трансформаторами.

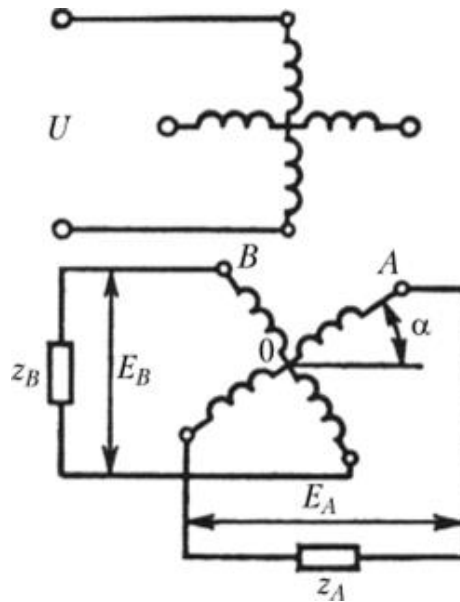


Рисунок 2.15 Синусокосинусный поворотный трансформатор

По максимальной погрешности (отклонению от синусной или линейной зависимости от угла α и ряду других показателей) поворотные трансформаторы делят на шесть классов точности. В высокоточных поворотных трансформаторах погрешность не превышает нескольких секунд.

2.10 Контрольные вопросы

1. Устройство, принцип действия и применение синус-косинусного вращающегося трансформатора.
2. Назначение, устройство и принцип действия системы синхронной связи на однофазных сельсинах.
3. Устройство, принцип действия и назначение однофазного сельсина.
4. Трансформаторный режим работы однофазных сельсинов. Практическое применение режима.
5. Индикаторный режим работы однофазных сельсинов. Практическое применение режима.
6. Устройство, принцип действия и назначение системы синхронной связи на магнесинах.
7. Устройство, принцип действия и назначение системы синхронной связи на трехфазных сельсинах.
8. Устройство, принцип действия и назначение системы электрического вала. Схема.
9. Дистанционная передача угла на вращающихся трансформаторах. Схема включения.

3 Специальные синхронные машины

3.1 Синхронные машины со сверхпроводящими обмотками

Синхронные машины со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Предельная мощность турбогенераторов с внутренним водяным охлаждением обмоток статора и ротора ограничивается 2 млн кВт. Дальнейший рост единичной мощности турбогенераторов возможен при применении сверхпроводящих обмоток возбуждения. Применение сверхпроводящих обмоток возбуждения в генераторах уже освоенных мощностей обеспечивает повышение КПД и снижение массы.

На рисунке 3.1 дан поперечный разрез турбогенератора КТГ-1.5 мощностью 1500 кВт А, 3000 об/мин. Ротор машины 1 представляет собой вращающийся криостат вакуумной изоляции. Жидкий гелий через узел подачи поступает на периферию бандажа ротора 2, удерживающего катушки возбуждения 3, и проходит через каналы в элементах крепления обмотки ротора. Пары гелия в центральной части делятся на два потока, охлаждающие концевые зоны ротора, экран 4 и токовводы. Газообразный гелий выходит из ротора при температуре, близкой к температуре окружающей среды. Ротор вращается в вакуумированном пространстве внутри оболочки из стеклопластика 5. Вакуум обеспечивается путем применения уплотнений. Сверхпроводящая обмотка ротора выполнена из ниобий-титановой шинки 3,5x2 мм в медной матрице. Плотность тока в обмотке возбуждения может достигать 100 А/мм². Статор машины 6 шихтованный из электротехнической стали. Обмотка статора 7 выполнена из медных проводников, охлаждаемых водой.

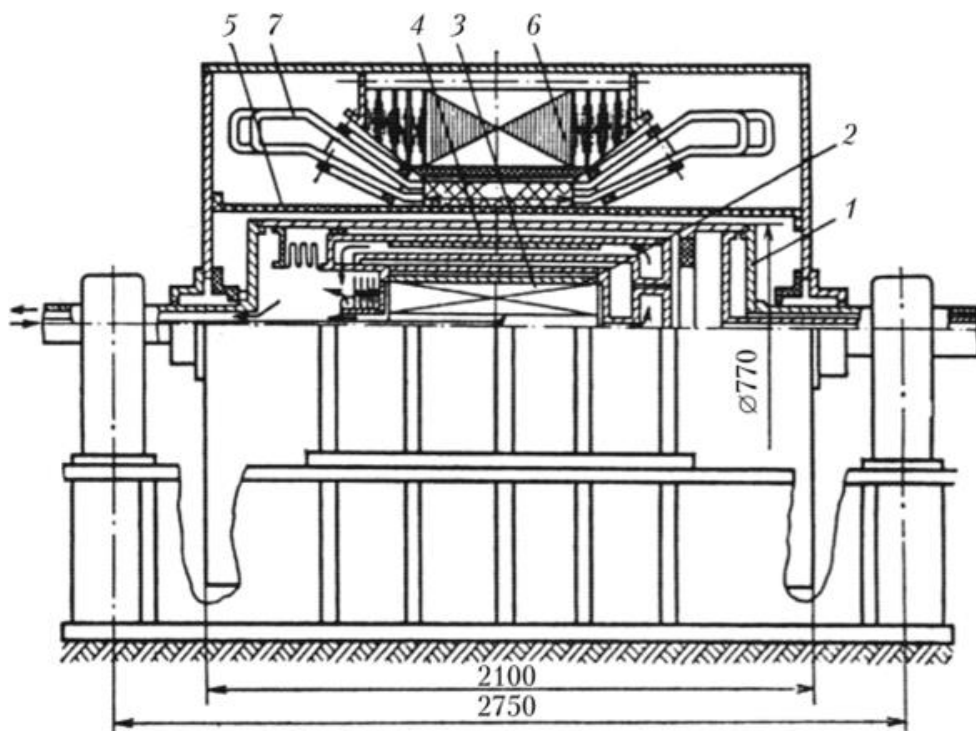


Рисунок 3.1 Криогенный турбогенератор 1500 кВт, 3000 об/мин

В электрических машинах со сверхпроводящими обмотками возбуждения индукция в зазоре может достигать 1,3 – 1,5 Тл, поэтому сердечник статора целесообразно выполнять с зубцами. Статор в криогенных электрических машинах делают беззубцовым с шихтованным ферромагнитным экраном, который концентрирует магнитное поле внутри машины. Момент в беспазовых машинах приложен к обмотке, что вызывает необходимость в более тщательном ее креплении. Крепление обмотки статора в пазовой части осуществляется с помощью системы клиньев. Лобовая часть обмотки крепится к бандажным кольцам из стеклопластика, которые устанавливаются на кронштейнах.

Синхронная машина со сверхпроводящими обмотками возбуждения может работать в генераторном и двигательном режимах. Применение криогенных двигателей обеспечивает снижение габаритов и повышение их энергетических показателей. Однако дефицит и стоимость гелия и сверхпроводящих материалов ограничивает применение криогенных машин.

3.2 Машины с постоянными магнитами

Одним из преимуществ машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения является то, что в них электрические потери в обмотке возбуждения равны нулю. Этим преимуществом обладают и машины с постоянными магнитами, которые называются еще магнитоэлектрическими машинами. Наибольшее распространение получили микродвигатели с постоянными магнитами. В самолетах, тракторах и автомобилях применяются генераторы с постоянными магнитами.

Статор *1* двигателей с постоянными магнитами (рисунок 3.2) ничем не отличается от статора машин общего назначения. На роторе расположены постоянные магниты *3* и пусковая короткозамкнутая обмотка *2*. Постоянные магниты па втулке *4* напрессовываются на вал *5*.

Выполнение ротора с постоянными магнитами может быть весьма разнообразным: в виде звездочки, цилиндра, намагниченного в радиальном или аксиальном направлении, и др. В последнее время в качестве движущейся части машины стали применять ферромагнитную резину, когда постоянные магниты вкраплены в резину, которая может иметь различную форму.

Постоянные магниты могут располагаться не только на роторе, но и на статоре машины. Одна из конструкций синхронного двигателя с расположением постоянных магнитов на статоре *1* с ограниченным перемещением ротора *2*, которая используется в моментных двигателях, показана на рисунке 3.3.

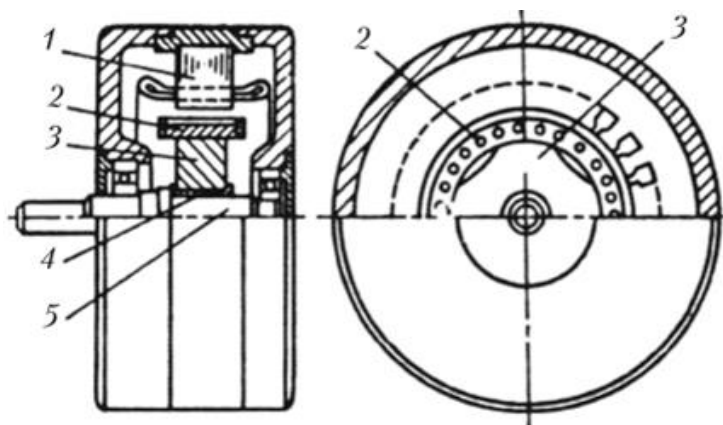


Рисунок 3.2 Двигатель с постоянными магнитами

3.3 Магнитоэлектрические машины

По сравнению с машинами электромагнитного возбуждения имеют ряд преимуществ: высокую надежность из-за отсутствия вращающихся обмоток, высокий КПД и меньшие нагревы из-за отсутствия потерь на возбуждение и в скользящем контакте, меньшие помехи радиоприему из-за отсутствия контактов.

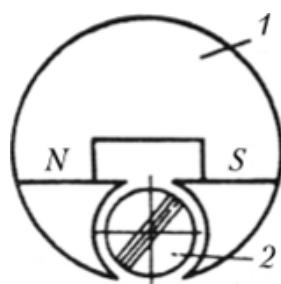


Рисунок 3.3 Моментный двигатель

Однако эти машины обладают и рядом недостатков: генераторы не допускают обычного способа регулирования напряжения (путем изменения тока возбуждения), они уже при мощности 300-400 Вт при имеющихся на сегодня серийных постоянных магнитах имеют повышенные стоимости, массу и габариты; двигатели с постоянными магнитами имеют плохие пусковые свойства.

Основным недостатком машин с постоянными магнитами является трудность регулирования потока возбуждения. Для регулирования потока возбуждения применяют обычное электромагнитное возбуждение, а также подмагничивание спинки статора.

Конструкция машин с постоянными магнитами определяется магнитными и технологическими свойствами постоянного магнита.

Постоянные магниты характеризуются петлей гистерезиса (рисунок 3.4а). Для оценки качества постоянных магнитов основное значение имеет часть петли во втором квадранте, которая называется кривой размагничивания. Предельная кривая размагничивания соответствует максимально возможному намагничиванию магнита.

Постоянный магнит характеризуется индукцией насыщения B_s , соответ-

ствующей ей напряженностью H_s , остаточной индукцией B_s и коэрцитивной силой H_c , а также коэффициентом возврата ρ и максимумом удельной магнитной энергии A_{\max} .

Коэффициент возврата

$$\rho = \frac{\Delta B}{\Delta H}. \quad (2.7)$$

Максимум удельной магнитной энергии, Дж/м³ (рисунок 3.4б):

$$A_{\max} = \frac{BH_{\max}}{2} \quad (2.8)$$

и соответствует индукции B_s и напряженности H_s .

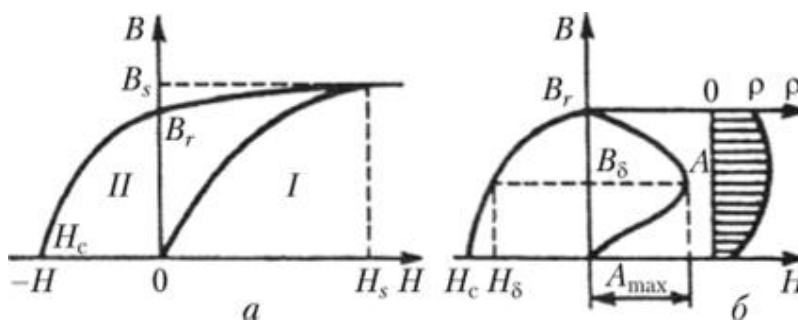


Рисунок 3.4 Основные характеристики постоянных магнитов

В электромашиностроении применяются сотни марок сталей и сплавов постоянных магнитов, имеющих остаточную индукцию $B_s = 0,2-0,5$ Тл и коэрцитивную силу $H_c = 4000-400000$ А/м. Свойства постоянных магнитов улучшаются при легировании сплавов микродозами редкоземельных элементов. Самарий-кобальтовые постоянные магниты имеют $H_c = 8000$ А/см, $B_s \sim 0,8$ Тл и удельную энергию $(BH)_{\max} = (160-240) \cdot 10^3$ Тл А/м. Применение постоянных магнитов с высокой удельной энергией дает возможность создать высокоиспользуемые электрические машины.

3.4 Машины с клювообразным ротором

Как уже подчеркивалось, преобразование энергии в электрических машинах происходит в воздушном зазоре – пространстве, где концентрируется энергия магнитного поля. При этом форма магнитного поля определяет в основном энергетические показатели машины. Наилучшие характеристики в машине можно получить при круговом поле.

При сосредоточенной катушечной обмотке синусоидальное распределение индукции в зазоре можно получить за счет определенного профиля воздушного зазора – его магнитной проводимости. В машинах с клювообразным

ротором распределение магнитного поля в воздушном зазоре, близкое к синусоидальному, достигается за счет профиля полюсного наконечника.

Стремление упростить конструкцию и технологию изготовления синхронных машин небольшой мощности массового производства привело к созданию машин с клювообразным (когтеобразным) ротором.

Клювообразные полюсные наконечники позволяют при одной катушке возбуждения, расположенной по оси машины, превратить аксиальное направление магнитного потока возбуждения в воздушном зазоре в радиально направленные потоки отдельных полюсов и получить многополюсную конструкцию синхронного генератора при относительно небольшом диаметре ротора. Такая конструкция дает значительную экономию меди обмотки возбуждения.

Ротор с клювообразными (когтеобразными) полюсами широко применяется в генераторах, устанавливаемых на автомобилях и тракторах.

Генератор на автомобиле работает параллельно с аккумуляторной батареей, которую он должен подзаряжать, поэтому на выходе такой генератор должен иметь постоянное напряжение. Автотракторный генератор — это вентильный генератор, в котором встроен выпрямительный блок на кремниевых диодах. Обычно применяется трехфазная двухполупериодная схема выпрямления. Выпрямительный блок установлен так, что он интенсивно охлаждается потоком воздуха, охлаждающего генератор.

Другой особенностью автотракторных генераторов, позволившей достигнуть высокой технологичности генератора, является применение статора с малым числом пазов на полюс и фазу ($q = < 1$).

Обмотки статора выполняются одно- или двухслойными. При $q < 1$ катушка располагается на трех зубцах и в пазу лежит одна сторона катушки, при $q > 1$ — на каждом зубце и в пазу лежат две стороны катушки.

До последнего времени генераторы были трехфазными с соединением фаз в звезду. С увеличением мощности стали переходить на соединение в треугольник и применять на статоре схемы двойная звезда и двойной треугольник. Появились автотракторные генераторы на пять и больше фаз.

На рисунке 3.5 представлена конструкция автомобильного генератора Г-250 с клювообразным ротором. Два клювообразных полюсных наконечника 1 образуют 12-полюсную магнитную систему. Полюсные наконечники изготавливаются методом холодной штамповки. Обмотка возбуждения 2 помещается на втулке 3. Статор 4 шихтованный с 18 пазами. Обмотка статора 5 трехфазная однослойная с $q = 0,5$. Корпус 6 (подшипниковые щиты) выполнен из алюминиевого сплава. Трехфазное переменное напряжение преобразуется в постоянное выпрямителем 7, собранным по схеме трехфазного двухполупериодного выпрямителя. Постоянный ток на ротор подается с помощью двух колец 8 и двух щеток 9.

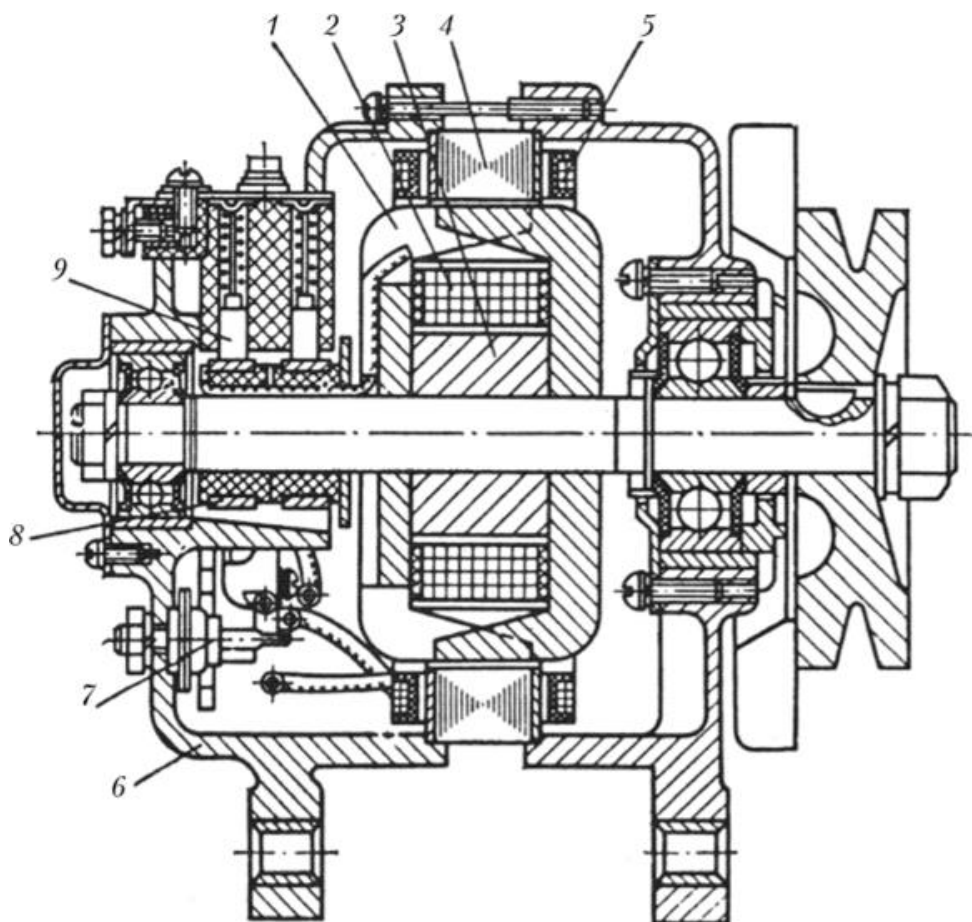


Рисунок 3.5 Автомобильный генератор Г-250

3.5 Индукторные синхронные машины

В большинстве электрических машин по гармоническим законам изменяются и токи, и параметры. Преобразование энергии происходит, если изменяются токи, а коэффициенты перед переменными – постоянные. Электромеханическое преобразование также возможно, если изменяются L и M , а токи – постоянные. Такие электрические машины называются параметрическими или индукторными машинами.

В индукторных машинах преобразование энергии происходит вследствие изменения взаимной индуктивности между ротором и статором. В индукторной машине все обмотки неподвижны, а изменение магнитного потока, пронизывающего обмотку статора, вызывается перемещением ферромагнитной массы. Ротор в виде звездочки вызывает изменение проводимости зазора под зубцом статора от максимального значения, когда зубец ротора совпадает с зубцом статора, до минимального, когда впадина (паз) ротора совпадает с зубцом статора. Соответственно меняется и индукция в воздушном зазоре от максимального B_{max} до минимального значения B_{min} . Следовательно, индукторной машиной можно называть электрическую машину переменного тока, у которой в режиме холостого хода магнитная индукция в любой точке внутренней поверхности статора изменяется только по амплитуде, не изменяясь по знаку.

На рис. 4.87, а показана схема высокочастотного индукторного генерато-

ра. Статор генератора явнополюсный, на полюсных наконечниках 1 имеются пазы и зубцы, в которых располагается обмотка переменного тока 2. Обмотка возбуждения 3 катушечная, в ней протекает постоянный ток. Ротор индукторного генератора 4 массивный с числом зубцов $z_2 = n$, где Z – число зубцов на статоре.

При вращении ротора изменяется проводимость воздушного зазора (рисунок 3.6б) и индукция в воздушном зазоре изменяется по трапецеидальному закону (рисунок 3.6в). Можно разложить кривую индукции в гармонический ряд и выделить 1-ю гармонику. В обмотке переменного тока за счет изменения индукции наведется ЭДС, равная

$$e = w_k \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_k \Phi_1 \sin \omega t, \quad (2.9)$$

где

$$\Phi_1 = 0,5 (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) \quad (2.10)$$

– амплитуда 1-й гармоники.

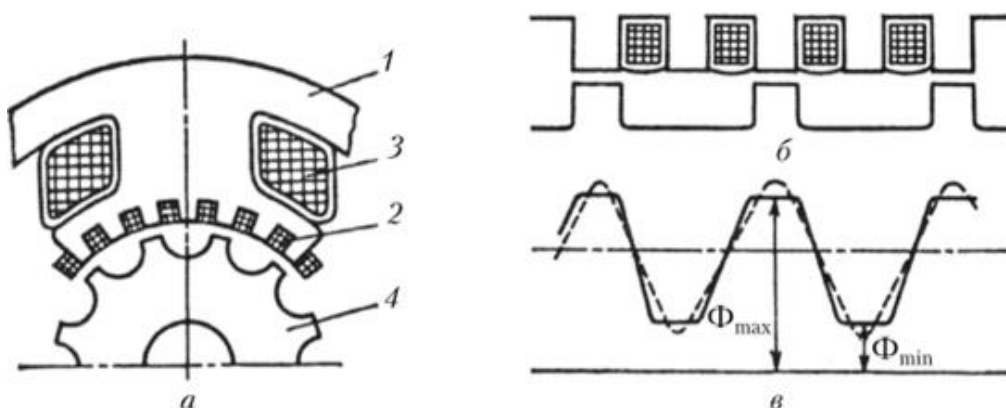


Рисунок 3.6 Схема индукторного генератора

Действующее значение ЭДС в обмотке переменного тока

$$E = 2,22 \frac{z_2 n}{60} w_k z_s (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}), \quad (2.11)$$

где z_2 – число зубцов па роторе; z_s – число последовательно соединенных катушек.

Высокочастотные индукторные генераторы выполняются частотой в десятки килогерц и мощностью в сотни киловатт. Такие мощности и высокие частоты требуются для электротермических установок, для питания радиолокационных установок и высокоскоростного электропривода.

В индукторном генераторе магнитный поток пульсирует не только в зубцах, но и в ярме, так как при вращении ротора изменяется магнитное сопротивление для тока возбуждения. Чтобы уменьшить пульсации потока в магнитопроводе, индукторные машины выполняют с двумя статорами 1 (рисунок 3.7) и двумя магнитопроводами ротора 2, смещенными относительно друг друга таким образом, что общее магнитное сопротивление машины при вращении ротора практически не изменяется, а поток пульсирует только в зубцовых зонах. В индукторном генераторе с аксиальным возбуждением обмотка возбуждения 3 создает поток, замыкающийся в аксиальном направлении, а в зубцовой зоне – в радиальном. Обмотка переменного тока расположена в пазах 4. На индукторе имеются зубцы 5, создающие пульсации индукции в зазоре машины.

Бесконтактные индукторные машины применяются в высокочастотных автономных энергетических системах и изготавливаются на высокие частоты вращения. Индукторные генераторы используются в качестве возбудителей крупных турбогенераторов.

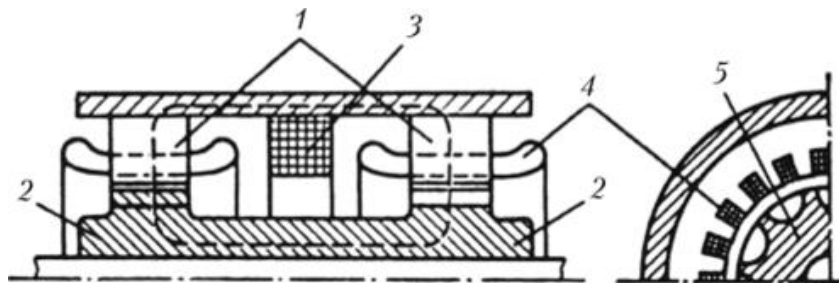


Рисунок 3.7 Двухполюсный индукторный генератор

Как и все электрические машины, индукторные машины обратимы. В двигательном режиме они применяются в качестве тихоходных высокочастотных и шаговых двигателей.

Синхронная частота вращения индукторных двигателей зависит от частоты сети и числа зубцов ротора z_2 :

$$n = \frac{f}{z_2}. \quad (2.12)$$

Выполняя на роторе большое число зубцов, при $f = 50$ Гц и $z_2 = 50$, например, частоту вращения получаем 1 об/с, или 60 об/мин. При больших диаметрах ротора и мелких зубцах можно получить частоту вращения до одного оборота в сутки.

Индукторные двигатели выполняют двух-, трех- и однофазными. На обмотку возбуждения подается выпрямленное напряжение. В индукторных двигателях применяются и постоянные магниты.

В однофазных индукторных двигателях применяются все способы пуска, рассмотренные для обычных однофазных синхронных двигателей.

Индукторные синхронные двигатели серий ДСР и ОРД выпускаются мощностью до сотен ватт и частотой вращения 1,2 и 60 об/мин в трех- и однофазном исполнении.

3.6 Шаговые двигатели

Шаговые, или импульсные, двигатели питаются импульсами электрической энергии, а ротор в зависимости от полярности импульсов перемещается по часовой стрелке или против часовой стрелки на определенный угол – шаг. Шаговые двигатели обычно маломощные индикаторные. Основная задача их – отрабатывать электрические импульсы, преобразуя электрические сигналы в угловые перемещения.

Для управления шаговыми двигателями используются коммутаторы на полупроводниковых элементах, формирующие импульсы, которые подаются на фазы обмотки шагового двигателя. Число фаз выбирается равным четырем или шести. Шаг двигателя может быть от 180 до 60°. В специальных установках шаг может быть несколько минут.

Шаговые двигатели могут быть выполнены на основе конструкции любых синхронных двигателей. Так как основным требованием к шаговым двигателям являются точность отработки сигналов и высокая частота импульсов, предпочтительны конструкции шагового двигателя, выполненного на базе реактивных и индукторных синхронных машин.

Шаговые двигатели характеризуются предельной частотой импульсов, которые двигатель обрабатывает без пропуска шага. Пусковые свойства шаговых двигателей характеризуются частотой приемистости – максимальной частотой импульсов, при которой возможен пуск без потери шагов. В зависимости от типа шагового двигателя и нагрузки частота приемистости колеблется от 10 до 104 Гц.

Математическое описание процессов преобразования энергии при импульсном питании осуществляется по уравнениям электромеханического преобразования энергии и их видоизменениям, когда форма напряжения – импульсная.

3.7 Гистерезисные двигатели

Недостатком синхронных двигателей являются их плохие пусковые свойства.

Гистерезисные двигатели сочетают в себе положительные качества асинхронных двигателей (хорошие пусковые характеристики) и синхронных двигателей – высокие энергетические показатели в установившемся режиме.

Сочетание положительных качеств синхронных и асинхронных машин достигается в гистерезисных двигателях за счет применения специальных магнитных материалов, из которых выполняется ротор двигателя. Стали типа викаллой и альни ведут себя при высоких частотах как магнитомягкие, а при подходе ротора к синхронной частоте вращения, когда частота снижается, – как магнитотвердые. Поэтому при пуске потери в стали ротора небольшие и за счет вихревых токов двигатель развивает асинхронный момент. При низких частотах в роторе образуются области намагничивания и ротор втягивается в синхронизм.

Недостатком гистерезисных двигателей является то, что при нагрузках,

близких к номинальным, эти области намагничивания могут «плавать», перемещаться по ротору. При этом машина выпадает из синхронизма.

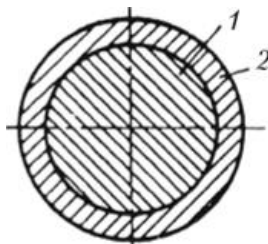


Рисунок 3.8 Ротор гистерезисного двигателя

Гистерезисные двигатели выполняются на мощности до десятков ватт. Конструкция статора обычная. Ротор выполняется в виде диска или цилиндра, состоящего из втулки 1, изготовленной из магнитомягкого материала, и магнитопровода 2, изготовленного из викаллой или другого магнитного материала, обладающего свойствами, сходными с викаллоем (рисунок 3.8).

Синхронные микродвигатели выполняются с катящимся и волновым ротором. Синхронные двигатели могут быть линейными, с сегментным статором, двухмерными и многомерными. Несмотря на обилие их конструктивного выполнения, появляются новые машины. Однако в основе их работы лежат законы электромеханического преобразования энергии.

3.8 Синхронная машина двойного питания

Если в асинхронной машине с фазным ротором обмотку статора и ротора подключить к сети таким образом, чтобы поля статора и ротора вращались в противоположные стороны, то можно получить частоту вращения выше синхронной частоты вращения. Неподвижность полей статора и ротора — непременное условие, при котором происходит электромеханическое преобразование энергии, будет тогда, когда ротор будет вращаться в сторону вращения поля статора с двойной частотой.

Недостатком машины двойного питания является то, что необходимо при пуске довести угловую скорость ротора до угловой скорости, равной $2\omega_c$, а затем включить напряжение на ротор, т.е. синхронизировать машину. Если подключить ротор к преобразователю частоты, который дает возможность регулировать частоту выходного напряжения, то можно получить регулирование частоты вращения вниз и вверх от синхронной частоты вращения.

Машина двойного питания, хотя и имеет конструкцию асинхронной машины, работает как синхронная. Для нее могут быть построены векторная диаграмма и схема замещения.

3.9 Асинхронизированная синхронная машина

При выпадении синхронной машины из синхронизма она переходит в асинхронный режим и частота в роторе $f_2 = f s$. Если подключить ротор к пре-

образователю частоты и выполнить обмотку возбуждения по продольной и поперечной осям, можно удерживать машину в синхронном режиме, питая двухфазным напряжением обмотки возбуждения от преобразователя частоты. Чем меньше скольжение (отклонение от синхронной частоты вращения), тем меньше мощность преобразователя частоты.

Асинхронизированная синхронная машина сохраняет устойчивость в аварийных режимах и может работать в синхронном и асинхронном режимах.

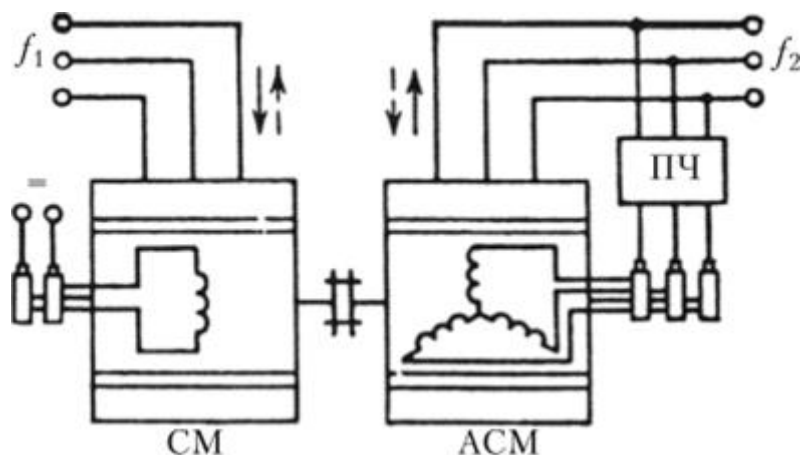


Рисунок 3.9 Электромеханическая вставка

Важным применением асинхронизированной синхронной машины является ее использование в качестве электромеханической вставки для связи двух энергосистем, незначительно отличающихся по частоте.

Принципиальная схема электромеханической вставки показана на рисунке 3.9. Синхронная машина СМ присоединена к сети с частотой f_1 , а асинхронизированная синхронная машина АСМ – к сети с частотой f_2 . Валы синхронной и асинхронизированной машин жестко соединены муфтой, и частота вращения у них одинаковая. Преобразователь частоты ПЧ обеспечивает возбуждение асинхронизированной синхронной машины. При передаче энергии из сети f_1 в сеть f_2 синхронная машина работает в двигательном режиме, а асинхронизированная – в генераторном. При передаче энергии из сети f_2 в сеть f_1 асинхронизированная синхронная машина работает в режиме двигателя, а синхронная – в режиме генератора. Направления мощности на рисунке 3.9 показаны стрелками.

Электромеханические вставки улучшают форму кривой напряжения, сглаживают броски токов в переходных режимах. Электромеханические вставки необходимы и при питании ответственных потребителей, когда необходимо отстроиться от высших гармоник, имеющих в сетях при использовании мощных тиристорных преобразователей и других нелинейных нагрузок.

Представляет интерес применение активных электромеханических вставок, когда синхронная и асинхронизированная машины соединены с валом паровой или гидравлической турбины. В этом случае обе машины могут работать в генераторном режиме или в режиме передачи энергии из одной сети в другую, что повышает устойчивость энергосистемы.

3.10 Контрольные вопросы

1. Устройство, принцип действия и назначение синхронного микродвигателя с постоянными магнитами. Создание пускового момента.
2. Создание пускового момента у однофазного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением.
3. Устройство, принцип действия и назначение однофазного синхронного тахогенератора.
4. Устройство, принцип действия и назначение трехфазного синхронного тахогенератора.
5. Устройство, принцип действия и назначение реактивного синхронного двигателя.
6. Устройство, принцип действия и назначение однофазного гистерезисного синхронного двигателя.
7. Устройство, принцип действия и назначение редукторного синхронного микродвигателя.
8. Устройство, принцип действия и применение однофазного синхронного двигателя с катящимся ротором.
9. Устройство, принцип действия и назначение однофазного синхронного двигателя с гибким волновым ротором.
10. Устройство, принцип действия и назначение шагового двигателя.
11. Устройство и особенности реактивного синхронного двигателя.
12. Каково отличие петли гистерезиса у магнитотвердых и магнитомягких материалов? Как это отличие используют в однофазных гистерезисных синхронных двигателях?
13. От чего зависит угловая скорость вращения катящегося ротора у однофазного синхронного двигателя? Каково соотношение скоростей вращения поля статора и катящегося ротора?
14. В чем заключается отличие активного и пассивного ротора у синхронных шаговых двигателей? Для чего предназначен коммутатор?
15. От чего зависит величина шага у синхронного шагового двигателя? Каков минимальный шаг у магнитоэлектрического синхронного шагового двигателя? Что препятствует его уменьшению?
16. Если у однофазного синхронного двигателя применен асинхронный пуск, то как устроен его ротор? Как изменяется пусковой момент по мере разгона ротора?

Литература

1. Александров Н.Н. Электрические машины и микромашины: учеб. для вузов. М.: Колос, 1983. 384 с.
2. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности (РЕПРИНТ): учеб. пособие. М.: Транспортная компания, 2016. 503 с.
3. Зарандия Ж.А., Кобелев А.В. Электрические машины: учеб. пособие. Тамбов: Тамбовский государственный техн. ун-т, ЭБС АСВ, 2020. 190 с.
4. Захарченко Д.Д., Романов Н.А. Тяговые электрические машины: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1991. 343 с.
5. Кацман М.М. Электрические машины: учеб. для СПО. М.: Академия, 2016. 496 с.
6. Кацман М.М., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических систем: учеб. для техникумов / под ред. Ф.М. Юферова. М.: Высш. шк., 1979. 261 с.
7. Ким К.К. Сверхпроводниковые электрические машины с магнитным подвесом: монография. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. 145 с.
8. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: учеб. пособие для вузов / под ред. А. И. Бертинова. М.: Энергоиздат, 1982. 552 с.
9. Торопцев Н.Д. Электрические машины сельскохозяйственного назначения. М.: Колос, 2005. 224 с.
10. Угольников А.В. Электрические машины: учеб. пособие. Саратов: Ай Пи Ар Медиа, 2019. 157 с.
11. Шевченко А.Ф., Приступ А.Г. Электрические машины с постоянными магнитами: учеб. пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный техн. ун-т, 2016. 64 с.

Учебное издание

Безик Валерий Александрович
Башлыков Виктор Акимович
Ковалев Виталий Витальевич

Специальные электрические машины

Учебное пособие

для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,
15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 01.02.2022 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 3,02. Тираж 25 экз. Изд. №7195.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ