

УДК 621.313-181.48(075.8)

ББК 32.96-04

С - 79

Рецензент: доктор технических наук, заведующий лабораторией института электродинамики НАНУ Антонов А.Е.

Степанковский Ю.В.

С-79 Преобразующие устройства приборов. Т.1. Электродвигатели. -К.: «Корнійчук», 2002. – 204 с., ил.

ISBN

Изложены в сопоставительном плане характеристики и свойства основных типов двигателей малой мощности, используемых в автоматических приборных системах. Рассмотрены вопросы влияния внешних условий на работу двигателей и выбора двигателей для различных типов нагрузок. Приложения содержат технические данные некоторых электродвигателей, в том числе гироскопических.

Предназначается для студентов приборостроительных специальностей высших учебных заведений.

ББК 32.96-04

Степанковський Ю.В.

С – 79 Перетворюючі пристрої приладів. Т.1. Електродвигуни. – К.: «Корнійчук», 2002. – 204 с., іл.

ISBN

Викладені в порівняльному плані характеристики і властивості основних типів двигунів малої потужності, що використовуються в автоматичних приладових системах. Розглянути питання впливу зовнішніх умов на роботу двигунів і вибору двигунів для різних типів навантажень. Додатки містять технічні дані деяких електродвигунів, у тому числі гіроскопічних.

Призначається для студентів приладобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів.

ББК 32.96-04

ISBN

© Степанковский Ю.В.,

2002

Ю.В.Степанковский

Преобразующие устройства приборов

Т.1. Электродвигатели (Силовые микромашины)

Содержание

Предисловие	4
Введение	5
В.1. Роль и значение электрических машин	5
В.2. Классификация электрических микромашин	6
Глава 1. Общие вопросы теории электрических машин	9
1.1. Основные магнитные величины	9
1.2. Некоторые характеристики и свойства магнитных материалов	11
1.3. Физические процессы в электромеханических преобразователях энергии. Принцип действия электрических машин	14
1.4. Некоторые общие свойства электрических машин	21
1.5. Вращающееся магнитное поле	22
1.6. Механическая характеристика асинхронного двигателя	27
1.7. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока	29
Глава 2. Силовые (неуправляемые) микродвигатели	31
2.1 Силовые микродвигатели переменного тока	31
2.1.1. Трехфазные асинхронные двигатели	32
2.1.2. Однофазные асинхронные двигатели	36
2.1.3. Синхронные микродвигатели	40
2.2. Силовые микродвигатели постоянного тока	50
2.3. Гироскопические двигатели (гиромоторы)	55
2.4. Тихоходные двигатели	61
Глава 3. Исполнительные (управляемые) двигатели	72
3.1. Исполнительные двигатели постоянного тока	73
3.1.1. Характеристики исполнительных двигателей постоянного тока с якорным управлением	74
3.1.2. Импульсное управление исполнительными двигателями постоянного тока	77
3.1.3. Использование тахогенератора для регулирования скорости вращения	82
3.1.4. Бесколлекторные двигатели постоянного тока	83
3.1.5. Переходные процессы в двигателях постоянного тока	89
3.2. Исполнительные двигатели переменного тока	93

3.2.1. Двухфазные асинхронные исполнительные двигатели	94
3.2.2. Переходные процессы в двигателях переменного тока	102
3.2.3. Индукторные исполнительные асинхронные двигатели	104
3.2.4. Шаговые двигатели	105
3.2.5. Датчики момента	112
Глава 4. Некоторые эксплуатационные характеристики двигателей	121
4.1. Показатели надежности двигателей	121
4.2. Особенности эксплуатации двигателей	126
4.3. Нагрев и охлаждение двигателей	128
Глава 5. Выбор двигателя	135
5.1. Некоторые общие соображения при выборе двигателя	136
5.2. Анализ моментов нагрузки	138
5.3. Области располагаемых моментов и скоростей	142
5.4. Выбор двигателя	149
5.4.1. Выбор силового микродвигателя	149
5.4.2. Выбор исполнительного двигателя	151
Приложения	154
П1. Обозначение электродвигателей на электросхемах	154
П.2. Технические данные гиродвигателей	158
П.3. Технические данные двигателей малой мощности	
для систем автоматики	163
П3.1. Силовые асинхронные двигатели	163
П3.2. Управляемые асинхронные двигатели	166
П3.3. Синхронные двигатели	175
П.3.4 Шаговые двигатели	177
П.3.5. Коллекторные двигатели постоянного тока	182
П.3.6. Бесколлекторные двигатели постоянного тока	196
П.3.7. Датчики момента	203
Литература	204

Предисловие.

В современном приборостроении используется огромное количество преобразующих устройств различного назначения, принципа действия, конструкции и др. По принципу действия их можно разделить на преобразователи, использующие для своего функционирования законы электромагнетизма, и использующие другие физические законы. В первых особое место занимают электрические микромашин, которые по назначению можно разделить на силовые (электродвигатели) и информационные. Среди преобразователей второй группы, наряду с традиционными, большое значение приобретают новые устройства, такие как пьезодвигатели, гребенчатые двигатели, устройства измерения малых перемещений и др.

В настоящее время практически отсутствует учебная литература, в которой собраны воедино все основные типы преобразователей, используемых в приборостроении. В большинстве учебников и учебных пособий, посвященных электрическим микромашин, глубоко анализируются вопросы их теории, расчета и конструкции. При этом обычно не рассматриваются вопросы их выбора и влияние условий эксплуатации на характеристики машин.

Вместе с тем для многих специальностей вузов изучение преобразователей имеет своей конечной целью научить будущих специалистов ориентироваться во всем их многообразии и уметь правильно выбрать для заданных условий эксплуатации устройство, обеспечивающее выполнение заданных функций.

В соответствии с такой постановкой задачи целью настоящего пособия является краткое ознакомление с принципом действия, конструкцией, характеристиками современных преобразователей, в первую очередь электрических микромашин, влиянием на них некоторых условий эксплуатации и рационального выбора из числа серийно выпускаемых.

Структурно пособие состоит из трех томов. Первый посвящен "силовым" преобразователям, под которыми подразумеваются электрические двигатели различного принципа действия, конструктивного исполнения и назначения. Во втором томе рассматриваются в основном информационные электромагнитные преобразователи. В третьем томе рассматриваются преобразователи неэлектромагнитного принципа действия.

Автор благодарит рецензента – доктора технических наук Антонова А.Е. за внимательный просмотр рукописи и ценные советы.

Автор примет с благодарностью все замечания и пожелания по улучшению качества настоящего пособия. Их можно направлять по адресу: Украина, г. Киев, пр. Победы, 37, НТУУ "Киевский политехнический институт", кафедра приборов и систем ориентации и навигации, Степанковскому Юрию Владимировичу или по электронной почте по адресу: uvs@pson.ntu-kpi.kiev.ua.

Введение

В.1. Роль и значение электрических машин

В настоящее время автоматизация глубоко внедрилась в промышленность, транспорт, сельское хозяйство, оборонную технику, быт. Огромное количество различных автоматических и телемеханических систем устанавливается на судах, самолетах, ракетах, в научно-исследовательских лабораториях и др.

Одним из основных видов энергии сегодняшнего дня является электрическая энергия. Широко распространенными элементами автоматики и телемеханики являются электрические машины малой мощности (от долей ватта до 600 ватт), которые принято называть электрическими микромашинами (ЭМ).

Современные достижения в области создания совершенных подвижных объектов, особенно беспилотных летательных аппаратов, не были бы возможны без соответствующего совершенствования электрических машин, значимость которых все более возрастает в общем комплекте бортового оборудования. Достаточно сказать, что на современном подвижном объекте устанавливается несколько сот электрических машин мощностью от долей ватта до десятков и сотен киловатт.

Электрические машины выполняют в схемах автоматики весьма разнообразные функции – осуществляют различные преобразования (механических величин в электрические и наоборот, электрические величины одного вида в электрические другого вида), обеспечивают работу следящих систем, производят преобразование координат и др. Например, на летательных аппаратах генераторы используются как источники основного и аварийного питания, электродвигатели используются для привода различных механизмов - насосов, механизма посадочных щитков, подвижных стабилизаторов, заслонок масляных и водяных радиаторов, посадочных выпускных фар, убирающегося шасси, вооружения, механизмов воздушных винтов изменяемого шага, а также широко используются в навигационных приборах в качестве носителей кинетического момента, коррекционных и исполнительных двигателей и др. Очень широкое применение находят электромагнитные устройства для снятия информации о положе-

нии и скорости различных механических частей подвижного объекта, приборов и передаче этой информации потребителю.

По мере развития вычислительных техники и других компактных средств обработки и представления информации электрические микромашины требуют совершенствования, поскольку в современном виде они уже часто сдерживают повышение качественных показателей приборов. Особенно необходимо повышать ресурс микромашин, снижать потребление энергии и тепловыделение, уменьшать массу и габариты, снижать уровень акустических шумов, массу и габариты, увеличивать быстродействие и т.д.

Необходимо отметить непрерывное увеличение органических взаимосвязей между системами автоматического управления в целом и ЭМ, как входящими в них элементами, увеличивающееся число возможностей воздействия на электрическую микромашину, как на объект регулирования.

Все это ставит перед конструкторами новой аппаратуры задачу правильного выбора и оценки комплекса "система-двигатель". Последнее, в свою очередь, требует хорошего знания основ теории, свойств и основных особенностей электрических микромашин.

В2. Классификация электрических микромашин

В зависимости от области использования все ЭМ условно можно разделить на две большие группы – машины общепромышленного (широкого) применения и машины автоматических устройств.

По роду тока ЭМ делят на машины переменного и постоянного тока. Машины переменного тока в зависимости от принципа действия и особенностей электромагнитной системы подразделяются на трансформаторы, асинхронные, синхронные, а машины постоянного тока на коллекторные и бесколлекторные.

Подавляющее большинство двигателей переменного тока широкого применения выпускается для работы от сетей частотой 50 Гц и стандартными напряжениями 127, 220 и 380 В. Двигатели постоянного тока обычно рассчитываются для работы от сетей с напряжением 110 и 220 В и реже на напряжение 3, 6, 12 и 24 В.

Стандартными напряжениями для работы электрических микромашин в бортовых автоматических системах являются: для машин постоянного тока 27 и 110 В, для машин переменного тока 220 В, 50 Гц; 36 В, 400 Гц; 40 В, 500 Гц; 36 В, 1000 Гц.

На рис. В.1 приведена классификация электрических микромашин по назначению.

Силовые микродвигатели приводят во вращение (обычно с постоянной скоростью) различные механизмы автоматических устройств, само-

пишущих приборов и т.п.

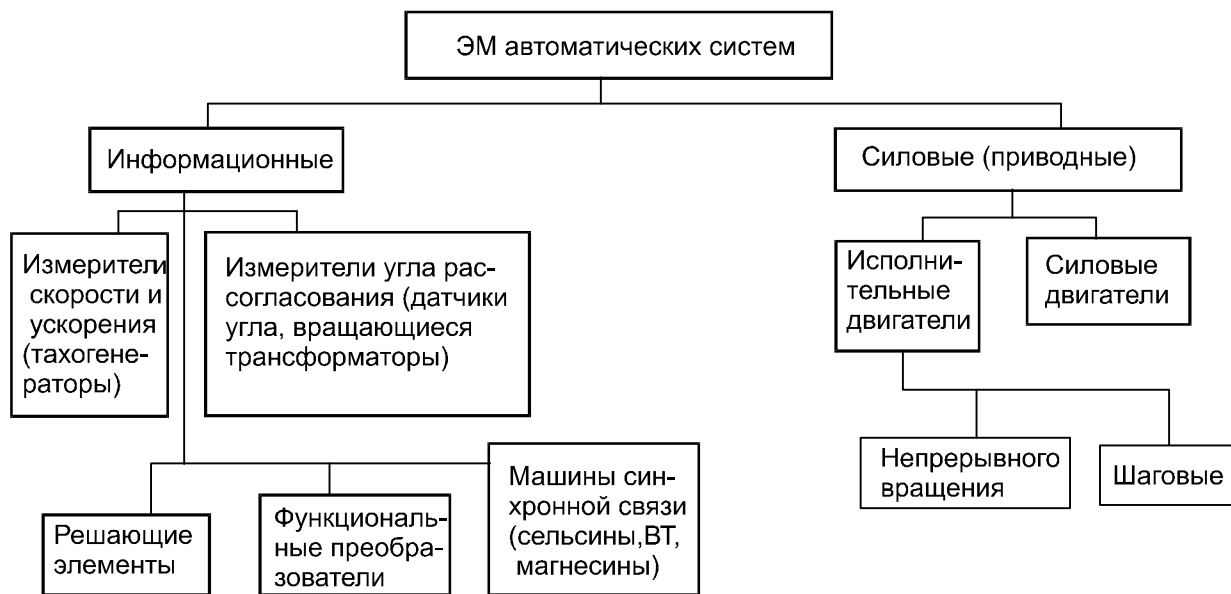


Рис.В.1. Классификация ЭМ по назначению

Исполнительные (управляемые) двигатели преобразуют подводимый к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, отрабатывая определенные команды.

Тахогенераторы преобразуют механическое вращение вала в электрический сигнал – напряжение, пропорциональное частоте вращения вала.

Машины синхронной связи осуществляют синхронный поворот нескольких механически не связанных между собой осей.

В классификационную таблицу не внесена группа электромашинных преобразователей энергии, так как они имеют в большинстве случаев выходную мощность более 600 Вт и не относятся к микромашинам.

Следует отметить некоторую условность и неоднозначность классификации ЭМ автоматических систем по назначению, приведенную на рис. В.1. Так, например, сельсины в некоторых случаях можно отнести к силовым машинам (при работе в индикаторном режиме), либо к измерителям угла (при работе в трансформаторном режиме) и др.

К ЭМ широкого применения обычно предъявляют требования высоких энергетических показателей и малой стоимости. К ним часто не предъявляют повышенных требований в отношении габаритов и массы, поскольку эти свойства, как правило, приобретаются за счет применения высококачественных материалов, усложнения технологии изготовления, увеличения трудоемкости, а, следовательно, и стоимости.

Требования, предъявляемые к ЭМ автоматических устройств, весьма разнообразны. Все их, однако, можно разделить на две группы – общие и

специфические. К общим относятся требования, относящиеся ко всем микромашинам независимо от выполняемых ими функций, принципа действия, конструкции:

- а) высокая точность преобразования исходных величин;
- б) стабильность выходных характеристик;
- в) высокое быстродействие;
- г) высокая надежность.

При этом у информационных и гироскопических микромашин на первый план выдвигаются показатели точности и стабильности характеристик. Силовые микромашины наряду с достаточной точностью и быстродействием должны иметь хорошие энергетические показатели.

Специфические требования весьма разнообразны и предъявляются к ЭМ в зависимости от области применения и условий эксплуатации. Они приводятся в технических условиях, нормалях, стандартах на различные типы и группы микромашин.

В первой части настоящего учебного пособия рассматриваются "силовые" микромашины систем автоматики – двигатели, как силовые, так и исполнительные.

Глава 1. Общие вопросы теории электрических машин

Рассмотрение электромеханических преобразователей целесообразно начать с рассмотрения физических законов, которым соответствуют физические процессы в преобразователях.

Следует отметить, что в подобных преобразователях обычно существуют два поля – электрическое и магнитное, однако магнитное преобладает, то есть они являются преимущественно индуктивными (магнитными) устройствами. Это обстоятельство вызвано тем, что современные магнитные материалы позволяют запасти в электромеханическом преобразователе гораздо большую магнитную энергию, чем диэлектрические материалы – электрическую энергию. Одна из причин этого становится ясной из сравнения выражений для плотности энергий электрического и магнитного полей $\varepsilon E^2/2$ и $\mu H^2/2$, где E , H – напряженности электрического и магнитного полей соответственно; ε имеет порядок 10^{-11} ф/м, а μ 10^{-6} Гн/м.

Если будут получены новые электротехнические материалы, допускающие высокие плотности запасенной энергии, то, несомненно, будут развиваться и конденсаторные (электрические) преобразователи.

1.1. Основные магнитные величины

Напомним основные магнитные величины, определяющие работу электромагнитных преобразователей.

Если i – сила тока в достаточно длинной катушке, w – число витков, l – длина катушки, то *напряженность* магнитного поля H на оси катушки определяется формулой

$$H = iw/l. \quad (1.1)$$

Единица СИ напряженности магнитного поля: $[H] = \text{Ампер/метр}$ (А/м). Произведение $i \cdot w$ часто называют числом *ампер-витков*.

Направление вектора напряженности магнитного поля в каждой точке совпадает с направлением силовых линий.

Важно отметить, что напряженность магнитного поля не зависит от среды, а определяется только геометрией проводников и величиной протекающего по ним тока (макроскопического), то есть может быть рассчитана.

Магнитодвижущей силой (мдс) между торцами цилиндрической катушки называется произведение напряженности магнитного поля на длину катушки:

$$F = Hl = iw. \quad (1.2)$$

Единицей измерения мдс является Ампер (А).

Для характеристики воздействия магнитного поля на движущиеся

заряды, проводники с токами и на молекулярные токи используется понятие *магнитной индукции* B . Это воздействие обычно определяется на основании измерений. Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля в вакууме определяется зависимостью

$$B_0 = \mu_0 H_0, \quad (1.3)$$

где коэффициент пропорциональности μ_0 называется *абсолютной магнитной проницаемостью вакуума*. Его значение зависит от выбранной системы единиц; в СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ кг·м/(А²·с²)=Гн/м.

Размерность индукции в СИ $[B] = \text{кг}/(\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{Тесла (Тл)}$.

Формула (1.3) с достаточной точностью справедлива и для воздуха.

Магнитная индукция – векторная величина. В вакууме ее направление совпадает с направлением напряженности магнитного поля.

Отметим, что в недействующей в настоящее время системе единиц CGS $\mu_0 = 1$, напряженность магнитного поля измеряется в эрстедах (Э), а магнитная индукция в гауссах (Гс). При этом 1 Э=79,6 А/м; 1 А/м=4π·10⁻³ Э =0,01257 Э; 1 Гс=10⁻⁴ Тл; 1 Тл=10⁴ Гс. В этой системе единиц напряженность и индукция поля в вакууме численно равны между собой.

Магнитным потоком называется произведение магнитной индукции на площадь поперечного сечения поля:

$$\Phi = B_H S, \quad (1.4)$$

где B_H – нормальная составляющая магнитной индукции, причем $B_H = B \cdot \cos(\vec{B}, \vec{n}_S) = B \cdot \cos \alpha$, где \vec{n}_S – направление нормали к площади S .

Единица СИ магнитного потока: $[\Phi] = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с} = \text{Вебер (Вб)}$.

В соответствии с выражением (1.4) индукцию B часто называют плотностью магнитного потока.

Если в магнитное поле поместить вещество, то магнитная индукция и магнитный поток изменяются (при неизменной напряженности магнитного поля).

Величина, показывающая во сколько раз изменится (увеличится или уменьшится) магнитная индукция в веществе, называется *относительной магнитной проницаемостью* μ :

$$\mu = B/B_0, \quad (1.5)$$

$$B = \mu_0 \mu H. \quad (1.6)$$

Произведение $\mu_0 \mu$ называется *абсолютной магнитной проницаемостью вещества*: $\mu_a = \mu_0 \mu$.

Относительная магнитная проницаемость не зависит от системы единиц и именно ее значение обычно приводится в таблицах магнитных материалов.

Приращение индукции $\Delta B = B - B_0$ называют намагниченностью J . Коэффициент пропорциональности между намагниченностью вещества и напряженностью поля называется магнитной восприимчивостью \varkappa :

$$J = \varkappa \mu_0 H. \quad (1.7)$$

Из выражения (1.7), полагая $J=\Delta B$, получим выражение для магнитной восприимчивости

$$\kappa = J/\mu_0 H = (B - B_0) / \mu_0 H = \mu - 1. \quad (1.8)$$

Вещества с $\mu \gg 1$, $\kappa \gg 1$ (например, железо, кобальт, никель, их соединения и сплавы) называются *ферромагнетиками*; поле в них может быть значительно усилено.

Вещества с $\mu > 1$, $\kappa > 0$ ($10^{-2} \dots 10^{-5}$) (например, платина, алюминий, воздух) называются *парамагнетиками*; поле в них лишь очень незначительно возрастает.

Вещества с $\mu > 1$, $\kappa < 0$ ($\approx -10^{-5}$) (например, серебро, медь, висмут) называются *диамагнетиками*; они незначительно ослабляют магнитное поле.

Используя в электромагнитных преобразователях в качестве элементов конструкции (магнитопроводов) ферромагнитные материалы, можно получать значительные магнитные поля с весьма большим значением индукции при сравнительно низкой напряженности поля.

В связи с огромным значением ферромагнетиков при создании электромагнитных преобразователей рассмотрим более подробно некоторые их свойства.

1.2. Некоторые характеристики и свойства магнитных материалов

Магнитные свойства ферромагнетиков обычно характеризуются зависимостями магнитной индукции B или намагниченности J от напряженности магнитного поля H . Графики таких зависимостей называются *кривыми намагничивания*.

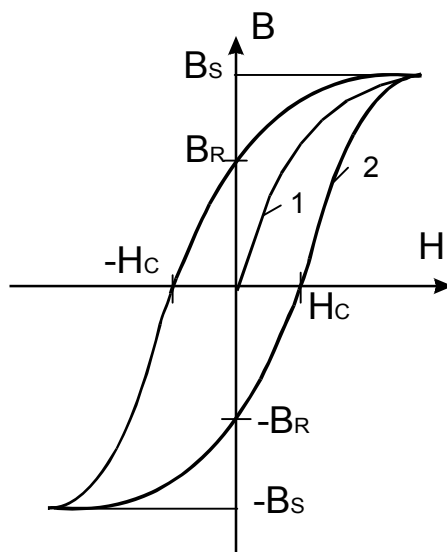


Рис. 1.1. Кривая намагничивания

Магнитные свойства материала зависят не только от напряженности поля, температуры, наличия или отсутствия механических напряжений и т.д., но и от предшествующего магнитного состояния.

Во многих случаях для получения кривых намагничивания в качестве исходного принимают размагниченное состояние образца, при котором в отсутствие внешнего поля индукция равна нулю и нет преимущественного направления намагничивания доменов.

Намагничивание предварительно размагниченного образца монотонно возрастающим полем происходит по начальной кривой (кривая 1 на рис.

1.1). При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует петлю гистерезиса (кривая 2 на рис. 1.1). Величина индукции B_R , сохраняющаяся при $H=0$ (при снятии поля), называется *остаточной индукцией*. Напряженность магнитного поля H_C , при которой индукция обращается в ноль, называется *коэрцитивной силой*. B_S – индукция насыщения.

Подставляя в выражение (1.6) конкретные значения B и H , получают различные виды магнитной проницаемости, применяемых в технике (свыше нескольких десятков).

Наиболее часто используют понятия нормальной магнитной проницаемости μ^{**} , начальной $\mu_{нач}$, максимальной $\mu_{мах}$, дифференциальной $\mu_{диф}$ и импульсной $\mu_{и}$.

Начальная и максимальная магнитные проницаемости представляют собой частные случаи нормальной проницаемости – наклон касательной на начальном участке кривой $B=f(H)$ характеризует начальную проницаемость, а наклон прямой, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальной проницаемости.

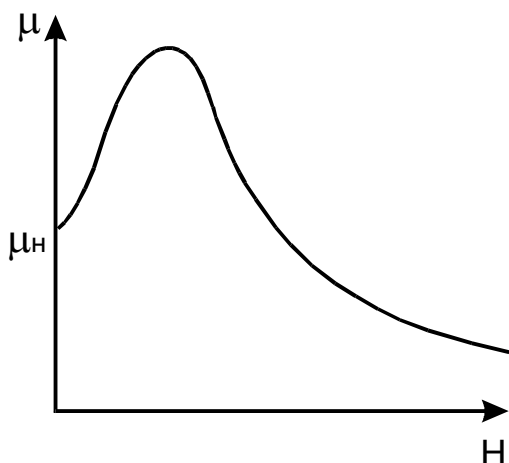


Рис.1.2. Зависимость $\mu=\mu(H)$

Дифференциальную магнитную проницаемость определяют как производную от магнитной индукции по напряженности магнитного поля для любой точки кривой намагничивания. Понятие $\mu_{диф}$ чаще всего используется при анализе вопросов, связанных с одновременным действием на магнитный материал постоянного и переменного магнитных полей.

На рис. 1.2 представлена зависимость $\mu=f(H)$.

При намагничивании магнитного материала переменным полем статическая петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии в течение одного цикла перемагничивания, расширяется (увеличивает свою площадь) как за счет потерь на гистерезис P_H так и потерь на вихревые токи P_B и дополнительные потери P_D . Такую петлю называют динамической, а сумму составляющих потерь – полными потерями.

Удельные потери на гистерезис при частоте перемагничивания f определяют по формуле

$$P_H=(f/\gamma) \cdot \oint HdB,$$

где γ - плотность материала.

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но также от электрических свойств материала (удельного электрического сопротивления) и формы сердечника. Для листового образца удельные потери на вихревые токи можно найти из выражения

$$p_{\epsilon} = 1,64 \cdot d^2 f^2 B_{max}^2 / (\gamma \rho),$$

где B_{max} – амплитуда магнитной индукции, d – толщина листа, γ – плотность, ρ – удельное электрическое сопротивление.

Дополнительные потери не поддаются аналитическому расчету и обычно определяются как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи.

Все изложенное о магнитных характеристиках относилось к замкнутой магнитной цепи, например, к кольцевым образцам. Наличие воздушного зазора, обладающего, как правило, большим магнитным сопротивлением, может существенно изменить ход кривых намагничивания, значения магнитной проницаемости, стабильности и другие свойства.

В таких случаях вводят понятие проницаемости тела, которое учитывает как свойства материала, так и конструкцию магнитной цепи:

$$\mu_{пв} = \frac{1}{1 + N_p (\mu - 1)} \mu,$$

где N_p – коэффициент размагничивания, который определяется для конкретной конфигурации магнитопровода по приближенным формулам или справочным таблицам.

Магнитные материалы подразделяются на две основные группы – *магнитомягкие* и *магнитотвердые*; в третью группу включают материалы специализированного назначения.

Характерными свойствами магнитомягких материалов является их способность намагничиваться до насыщения даже в слабых полях (высокая магнитная проницаемость) и малые потери на перемагничивание. Сюда относятся в первую очередь электротехнические кремнистые стали, низкоуглеродистые электротехнические стали, магнитомягкие ферриты и пермаллои – сплавы железа с никелем или железа с никелем и кобальтом, обычно легированные молибденом, хромом и другими элементами. Максимальная магнитная проницаемость некоторых пермаллоев достигает нескольких десятков тысяч.

Магнитотвердые материалы обладают большой удельной энергией. Эта энергия тем больше, чем больше остаточная индукция и коэрцитивная сила материала. Сюда, в первую очередь, относятся железо-никель-алюминиевые сплавы, сплавы на основе редкоземельных металлов и сплавы на основе благородных металлов.

Форма петли гистерезиса, индукция насыщения и остаточная индукция у магнитомягких и магнитотвердых материалов примерно одинаковы, а разница в коэрцитивной силе достигает очень большой величины. Другими словами, магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса с небольшой коэрцитивной силой, а магнитотвердые – широкую петлю с большой коэрцитивной силой.

Границы значений коэрцитивной силы, по которым материал можно отнести к группе магнитомягких или магнитотвердых, условны. Принято, что к магнитомягким относятся материалы с $H_C < 4$ кА/м, а к магнитотвердым – материалы с $H_C > 4$ кА/м. Термины "магнитомягкий" и "магнитотвердый" не относятся к характеристике механических свойств материала.

1.3. Физические процессы в электромеханических преобразователях энергии. Принцип действия электрических машин.

Принцип действия электрических машин определяется в основном двумя законами электромагнетизма – законом Фарадея и законом Ампера.

Закон Фарадея утверждает, что при изменении потокосцепления Ψ какого-либо контура, в этом контуре возникает электродвижущая сила (эдс). Потокосцепление может изменяться как из-за изменения величины во времени t , так и вследствие перемещения контура, то есть изменения по пространственной координате x . Поэтому в общем случае закон Фарадея для единичного контура (когда Ψ равно потоку Φ) описывается уравнением

$$e = -\frac{d\Phi(x,t)}{dt} = -\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\dot{x} + \frac{\partial\Phi}{\partial t}\right). \quad (1.9)$$

Первое слагаемое в этом выражении определяет эдс, возникающую в проводнике, движущемся со скоростью $\bar{v} = \dot{x}$ в постоянном магнитном поле с индукцией \bar{B} (так называемая эдс движения). Оно может быть приведено к виду

$$e = \int_0^l \bar{B} d\bar{l} \bar{v}, \quad (1.10)$$

где $d\bar{l}$ – элемент длины проводника.

Если предположить, что в пределах длины проводника поле однородно ($\bar{B} = \text{const}$) и скорость одинакова и все три вектора взаимно перпендикулярны, то выражение (1.10) принимает вид

$$e = Blv. \quad (1.11)$$

Если вектор \bar{v} не перпендикулярен вектору \bar{B} , то нужно рассматривать соответствующие компоненты векторов.

Второе слагаемое в выражении (1.9) описывает процесс в неподвижном проводнике ($\bar{v} = 0$) при изменении магнитного потока, в котором находится данный проводник, и определяет так называемую трансформаторную эдс

$$e = -d\Phi/dt = -\partial\Phi/\partial t. \quad (1.12)$$

Это выражение показывает, что величина эдс пропорциональна скорости изменения во времени потока Φ , связанного с проводником. Знак минус учитывает направление индуцируемой эдс и диктуется законом Ленца. При этом следует отметить, что эдс индукции возникает при пере-

сечении магнитного потока и в замкнутых контурах, и в разомкнутых проводниках, и в сплошных металлических и неметаллических телах, где образуются вихревые токи. Направление эдс можно определить по правилу правой руки.

На проводник, обтекаемый током, в магнитном поле, в соответствии с законом Ампера, действует механическая сила

$$d\vec{F} = JdS\vec{l} \times \vec{B}, \quad (1.13)$$

где J – плотность тока; dS – элемент площади поперечного сечения проводника.

При однородном распределении тока I по линейному проводнику механическая сила, действующая на весь проводник,

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}. \quad (1.14)$$

Сила является векторным произведением и, следовательно, перпендикулярна плоскости векторов \vec{l}, \vec{B} ; ее значение максимально, если проводник и поле взаимно перпендикулярны. Направление силы может быть определено по правилу левой руки.

На основании изложенного рассмотрим принцип действия электрических двигателей и генераторов.

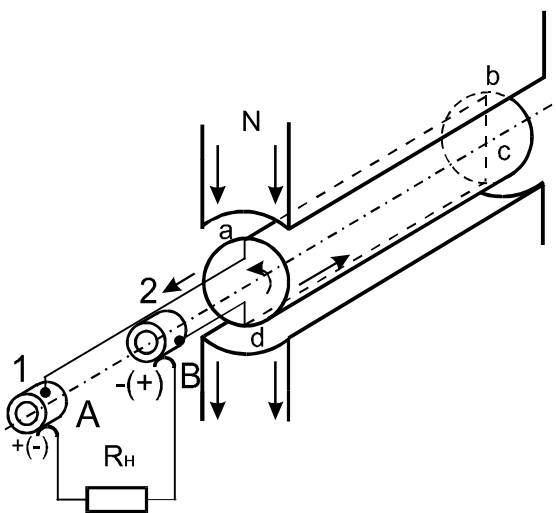


Рис. 1.3. Принципиальная схема генератора переменного тока

Рассмотрим вначале принцип действия простейшего генератора переменного тока. Его работа заключается в следующем (см. рис. 1.3): при вращении рамки $abcd$ в постоянном магнитном поле в проводниках ab и cd наводится эдс, направление которой определяется по правилу правой руки. Ток во внешней цепи направлен от кольца 1 к кольцу 2 (кольца выполнены из токопроводящего материала, изолированы друг от друга и предназначены для отвода энергии во внешнюю цепь с помощью неподвижных щеток A и B). При повороте рамки на 180° проводники ab и cd меняются местами, в результате чего изменяется направление тока во внешней цепи.

Таким образом, в контуре действует переменная эдс и течет переменный ток, дважды изменяющий свое направление за один поворот рамки. При повороте проводника на каждую пару полюсов магнита, создающего магнитное поле, в рамке наводится эдс частотой

$$f = pn/60 \text{ Гц}, \quad (1.15)$$

где p – число пар полюсов машины; n – скорость вращения рамки, об/мин; 60 – переводной коэффициент.

В отличие от рассмотренного генератора в генераторе постоянного тока вместо колец имеется коллектор, служащий для получения во внешней цепи выпрямленного тока; он

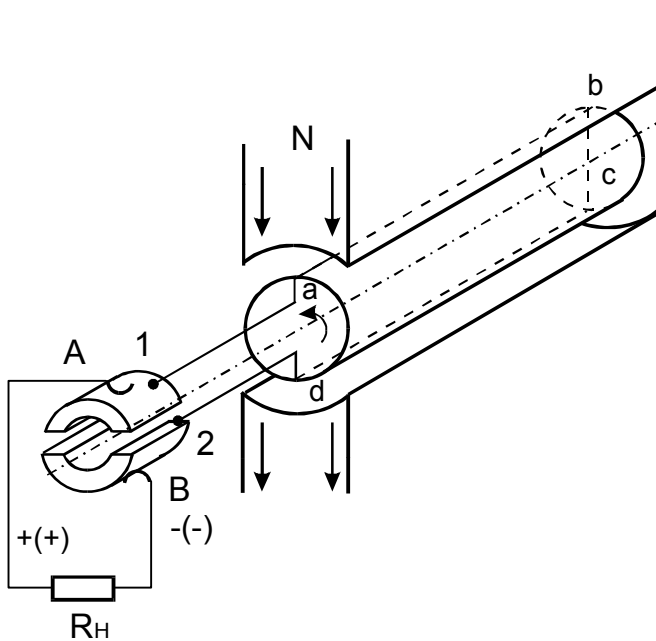


Рис. 1.4. Принципиальная схема генератора постоянного тока

состоит из токопроводящих пластин, выполненных в нашем случае из двух полуколец, наглухо насаженных на вал и изолированных как от вала, так и друг от друга. Щетки (токоподводы) относительно коллектора на корпусе устанавливают так, чтобы переход каждой из щеток с одной пластины на другую происходил в тот момент, когда наводимая в рамке эдс равна нулю (рис. 1.4). В этом случае в рамке $abcd$ наводится также переменная эдс, но к каждой из щеток подводится эдс только одного знака. Так, например, щетка A , касаясь пластины 1, имеет

всегда положительный потенциал (+), так как к ней подводится эдс от проводника ab , находящегося под северным полюсом. При повороте рамки на 180° щетка A соприкасается с пластиной 2, и по прежнему имеет положительный потенциал, так как к ней подводится эдс уже от проводника cd , заменившего проводник ab под северным полюсом. Проведя аналогичное рассуждение, можно видеть, что щетка B имеет всегда отрицательный потенциал (-). Таким образом, по внешнему участку цепи ток течет всегда только в одном направлении, то есть, имеет место пульсирующий ток. При увеличении числа витков и коллекторных пластин пульсация уменьшается. Например, при восьми коллекторных пластинах, приходящихся на каждый полюс, пульсация напряжения на щетках не превышает 1% от среднего значения, поэтому ток, протекающий во внешней цепи, можно считать практически постоянным.

Устройство двигателя постоянного тока аналогично генератору. Коллектор в двигателе служит не для выпрямления тока, а для получения вращающего момента одного направления.

Принцип действия двигателя и назначение коллектора можно уяснить из принципиальной схемы двигателя (рис. 1.5). К щеткам A и B подведено постоянное напряжение и по проводникам проходит ток, направление которого указано стрелками.

При взаимодействии тока в проводниках и магнитного поля, создаваемого магнитом, возникают электромагнитные силы. Воспользовавшись

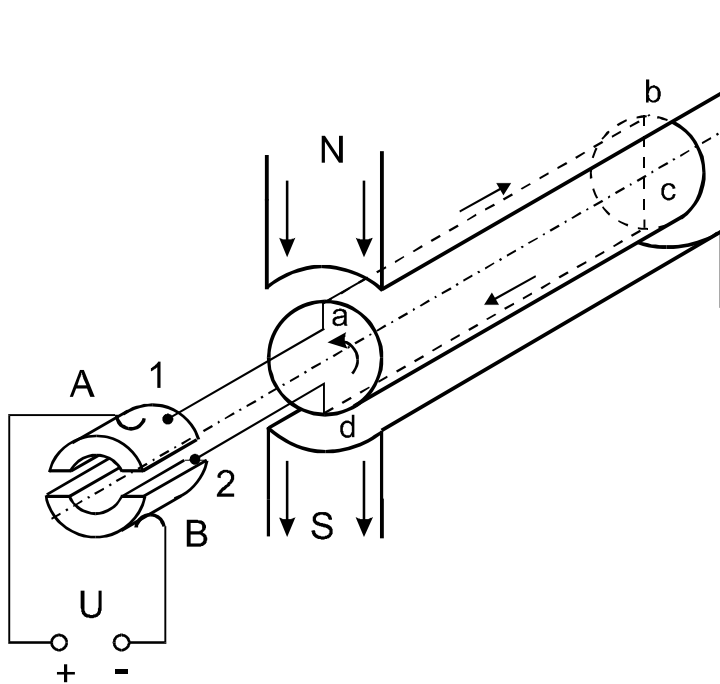


Рис.1.5. Принципиальная схема двигателя постоянного тока

правилом левой руки, можно определить направление движения проводников ab и cd и, следовательно, направление вращения рамки, которое будет происходить в нашем случае по часовой стрелке. При повороте рамки на 180° проводники ab и cd меняются местами, но также поворачивается и коллектор, что приводит к изменению тока в проводниках и сохранению направления момента и, соответственно, вращения.

Существенно отметить, что конструктивно генератор и двигатель ничем не отличаются друг от друга. Они отличаются только направлением преобразования энергии.

Рассмотренный принцип действия двигателей и генераторов показывает, что для работы любой электрической машины принципиально необходимо наличие магнитного поля и проводников, по которым может протекать ток.

Магнитное поле в электрических машинах создается электромагнитами или постоянными магнитами. В первом случае это осуществляется с помощью сердечника из магнитомягкого материала с намотанной на нем катушкой, по которой пропускают постоянный ток; при этом можно создавать поля большой интенсивности и регулировать их, воздействуя на условия работы машины. Машины при таком способе создания магнитного поля называются машинами постоянного тока с *электромагнитным возбуждением*. В случае создания магнитного поля в машине с помощью постоянных магнитов она называется машиной постоянного тока с *магнитоэлектрическим возбуждением*.

Часть электрической машины постоянного тока, в обмотках которой наводится эдс, называется *якорем*, а та часть машины, которая создает постоянное магнитное поле, называется *индуктором*. Обычно индуктор конструктивно связан с корпусом машины и называется в этом случае *статором* (неподвижным), а якорь машины может поворачиваться относительно корпуса, то есть является *ротором* (вращающимся).

Отличительной особенностью машин постоянного тока является наличие в них щеточно-коллекторного узла для подвода (или снятия) напряжения к якорю и создания вращающего момента одного направления.

На рис 1.6 изображена схема конструкции электрической машины постоянного тока.

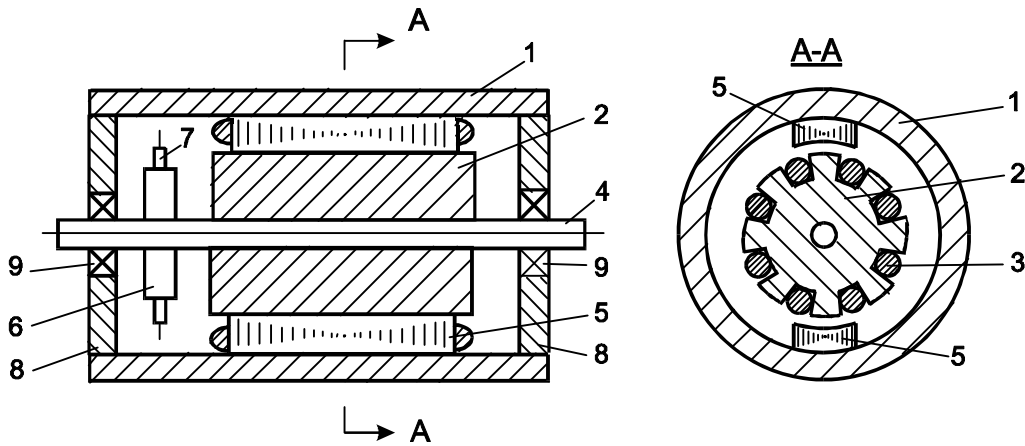


Рис.1.6. Схема конструкции машины постоянного тока

К круглой станине 1 (корпусу) крепят два подшипниковых щита 8 и полюса 5; внутри корпуса помещается якорь 2, закрепленный на оси 4, которая вращается в подшипниках 9, установленных в щитах; напряжение на якорь подается через щетки 7 и коллектор 6. Якорь машины, изображенный на рис. 1.6, имеет так называемую барабанную конструкцию, имеющую по образующей пазы, в которые укладываются проводники 3, соединенные соответствующим образом с коллектором 6. На статоре изображенной на рисунке машины расположена так называемая сосредоточенная обмотка.

Линии магнитного поля в электрической машине замыкаются по магнитной цепи, включающей в себя как неподвижную, так и подвижную части, разделенные между собой воздушным (немагнитным) зазором δ , который для уменьшения потерь стремятся делать как можно меньше.

Статор и ротор машины выполняются шихтованными, то есть набираются из пластин, из высококачественной электротехнической стали. Магнитопроводы выполняются из изолированных друг от друга пластин для увеличения активного сопротивления, так как при вращении зубчатого якоря из-за пульсации магнитного потока в воздушном зазоре в них возникают вихревые токи и потери мощности. Обмотки и коллекторные пластины выполняются из меди. Внешняя цепь машины подсоединяется к коллектору посредством графитовых или металографитовых щеток, которые помещаются в обоймах щеткодержателей и прижимаются к коллектору пружинами. В машинах с магнитоэлектрическим возбуждением полюса выполняются из твердых ферромагнитных сплавов.

Схемы выполнения роторных обмоток достаточно разнообразны. Основным элементом обмотки является секция, под которой понимают часть обмотки якоря, находящуюся между двумя коллекторными пластинами, следующими друг за другом при обходе обмотки по схеме. Те части секции, которые расположены в пазах, называют активными сторонами, вне пазов – лобовыми частями.

Полюсным делением (полюсным шагом) называют часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс:

$$\tau = \pi D / 2p,$$

где D – диаметр якоря.

В машинах постоянного тока (генераторах) при холостом ходе существует только основной магнитный поток, создаваемый намагничивающей силой возбуждения. При нагрузке, когда по обмотке якоря течет ток, возникает намагничивающая сила якоря, которая взаимодействует с полем возбуждения и оказывает значительное влияние на работу машины. При работе машины под нагрузкой в ней образуется результирующий поток, созданный совместным действием намагничивающих сил возбуждения и якоря. Уменьшение основного потока за счет воздействия потока якоря поток называется *реакцией якоря*.

Следствием реакции якоря нагруженной машины является:

- 1) ослабление общего поля и уменьшение эдс якоря (при насыщенной магнитной цепи);
- 2) смещение физической нейтрали, то есть линии, проходящей через те точки окружности якоря, где индукция равна нулю.

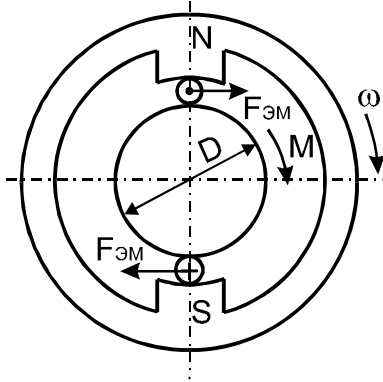


Рис. 1.7. К принципу действия асинхронного двигателя

Для уяснения принципа действия двигателя переменного тока рассмотрим рис. 1.7.

В пространстве между двумя полюсами (постоянными магнитами или электромагнитами) находится цилиндр диаметром D с укрепленным на нем короткозамкнутым витком. Цилиндр закреплен на валу и может вращаться.

Если полюса привести во вращение, то в проводнике, образующем виток, по закону электромагнитной индукции будет наводиться эдс, направление которой можно определить по правилу правой руки. Так как виток замкнут, то в нем появится ток, направление которого совпадает с направлением эдс.

При взаимодействии проводника с током в магнитном поле возникают электромагнитные силы $F_{эм}$, направление которых можно определить по правилу левой руки. Пара сил создает момент $M = F_{эм} \cdot D$, вращаю-

ший барабан с витком (ротор) в направлении вращения поля. Скорость вращения ротора в такой машине будет всегда меньше скорости вращения полюсов (поля), так как только в этом случае возможно наведение эдс в проводнике и возникновение электромагнитных сил и вращающего момента. Поэтому такая машина получила название *асинхронной*, то есть не-синхронной.

В рассмотренной схеме вращающееся магнитное поле получается при механическом вращении полюсов. В данном случае происходит преобразование механической энергии в механическую. Чтобы получить подлинную схему электродвигателя, надо заменить вращение полюсов вращающимся полем, создаваемым иным путем.

В реальных машинах вращающееся магнитное поле получают с помощью специальной группы обмоток, подключенных к источнику переменного тока, поэтому асинхронные машины относятся к устройствам переменного тока. Эти обмотки обычно неподвижны и располагаются на статоре. Последний имеет цилиндрическую форму и набирается из колец электротехнической стали, то есть выполняется шихтованным (для уменьшения вихревых токов). Обмотки обычно укладываются в пазы, выполненные по внутренней поверхности статора. Магнитная система в этом случае не имеет явно выраженных полюсов.

Ротор также выполняется из листов электротехнической стали, укреплен на валу и может свободно вращаться внутри статора. На внешней поверхности ротора имеются пазы, расположенные по образующей, в которые укладываются обмотки ротора. В зависимости от типа обмотки ротора асинхронные машины бывают с короткозамкнутой обмоткой (короткозамкнутые) или с фазной обмоткой, соединенной с контактными кольцами для подключения к внешним источникам.

Электрические асинхронные микромашины выполняются только короткозамкнутыми.

В этом случае короткозамкнутая обмотка может быть выполнена

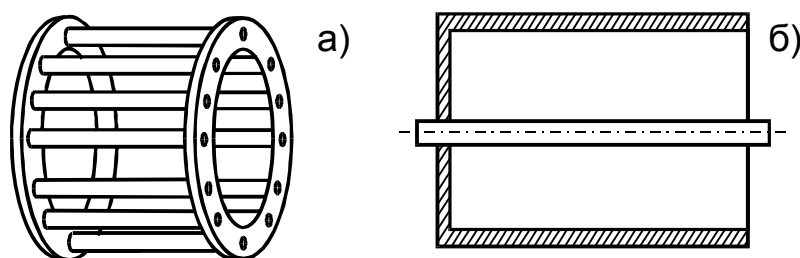


Рис. 1.8. "Беличья клетка" (а) и полый немагнитный ротор (б)

либо в виде "беличьей клетки" путем заливки пазов ротора медью или алюминием с одновременной заливкой замыкающих колец (рис. 1.8,а), либо в виде полого цилиндра, выполненного из не-

магнитного материала (например, алюминия) (рис. 1.8,б). Реже ротор выполняется в виде полого ферромагнитного стакана, либо полого омедненного ферромагнитного стакана.

Ротор вращается в подшипниках (качения или скольжения), закрепленных в крышках – подшипниковых щитах.

Обозначим через n_1 скорость вращения магнитного поля, создаваемого статором, через n_2 – скорость вращения ротора. Отношение

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (1.16)$$

называется *скольжением* асинхронной машины.

В зависимости от соотношения между n_1 и n_2 различают три режима работы асинхронной машины:

1) работу в режиме двигателя, когда $n_2 < n_1$ и скорости вращения поля и ротора направлены в одну сторону ($0 \leq s \leq 1$);

2) работу в режиме генератора, когда $n_2 > n_1$ и скорости вращения направлены в одну сторону ($0 \geq s \geq -\infty$);

3) работу в режиме электромагнитного тормоза, когда скорости вращения n_1 и n_2 направлены в разные стороны ($1 \leq s \leq \infty$).

Основным режимом работы асинхронных машин является двигательный.

Синхронные двигатели также относятся к классу машин переменного тока. Принципиальным отличием их от асинхронных является то, что скорость вращения ротора у них в нормальном режиме эксплуатации строго равна скорости вращения магнитного поля ($n_1 = n_2$). Это достигается за счет применения ротора специальной конструкции, например, выполненного из постоянного магнита. В этом случае полюса вращающегося магнитного поля статора имеют упругую связь (сцепление) с магнитами ротора и увлекают их.

Статор синхронного двигателя принципиально ничем не отличается от статора асинхронного двигателя.

1.4. Некоторые общие свойства электрических машин

Все электрические машины имеют много общего. В каждой электрической машине имеется статор и ротор, разделенные относительно малым воздушным зазором. У большинства машин магнитопроводы статора и ротора имеют радиальную симметрию магнитных свойств, а их поверхности, обращенные к зазору, могут рассматриваться как гладкие цилиндрические поверхности. Исключением являются двигатели постоянного тока, а также некоторые типы синхронных двигателей и явнополюсные сельсины, у которых один из магнитопроводов образует явно выраженные полюса. В магнитопроводах статора и ротора имеются пазы, в которых уложены по тому или иному закону обмотки. Закон распределения и тип обмотки в большинстве машин выбираются такими, чтобы коэффициент взаимной индукции между обмотками статора и ротора изменялся по синусоидальному закону от угла поворота ротора. Естественно, что это можно выполнить только с некоторым приближением; практически зависимость

коэффициентов взаимной индукции обмоток от угла поворота ротора является некоторой периодической функцией, которая при разложении в гармонический ряд содержит кроме основной и высшие гармоники.

Электромагнитные процессы в машинах определяются магнитными полями в воздушном зазоре, создаваемыми токами, текущими вдоль оси машины. Токи в лобовых соединениях обмоток имеют значительно меньшее влияние и образуют магнитные потоки рассеяния. Распределение потоков по воздушному зазору машины и их изменение во времени, в конечном счете, определяют тип машины и все ее характеристики. Распределение потоков, в свою очередь, зависит от типа обмотки, а изменение во времени – от характера подводимого к обмоткам напряжения. Подавляющее большинство существующих обмоток может быть сведено к следующим четырем типам:

- 1) катушечная обмотка, как правило, на явно выраженных полюсах;
- 2) многофазная распределенная обмотка;
- 3) короткозамкнутая симметричная обмотка ("беличья клетка", полый немагнитный ротор, омедненный ферромагнитный ротор и т.п.);
- 4) обмотка якоря коллекторных машин (коллекторная обмотка).

1.5. Вращающееся магнитное поле

Ранее мы выяснили, что для работы двигателей переменного тока необходимо наличие вращающегося магнитного поля.

Рассмотрим условия получения вращающегося магнитного поля с помощью неподвижной системы обмоток. Для этого каждая из обмоток, питающаяся от синусоидально изменяющегося напряжения, должна иметь мдс, синусоидально распределенную в пространстве, то есть по расточке статора или по окружности ротора. Несоблюдение этих условий, то есть питание от несинусоидального напряжения или несинусоидальное распределение мдс, приводит к появлению высших гармоник в кривой распределения магнитного потока, что ведет к ухудшению энергетических показателей машины. Для подавления высших гармоник в двигателях выполняют соответствующие мероприятия - распределение обмоток по пазам, укорочение шага, скос пазов, и в этом случае магнитодвижущая сила имеет достаточно синусоидальное распределение в каждой точке воздушного зазора при питании обмоток синусоидальным напряжением. В дальнейшем будем полагать, что распределение мдс в зазоре машины синусоидально.

При питании однофазной обмотки (напомним, что фазой электрической машины называется независимая группа обмоток) синусоидальным напряжением в каждой точке воздушного зазора, расположенной на расстоянии x от обмотки, будет действовать магнитодвижущая сила

$$F_X = F_0 \cos(\pi x / \tau) = F_M \sin(\omega t) \cos(\pi x / \tau), \quad (1.17)$$

где F_0 - мдс в точке, расположенной на оси обмотки; ω - частота изменения тока в обмотке; $\tau = \pi D / 2p$ - полюсное деление (полюсный шаг); D - внутренний диаметр статора; p - число пар полюсов обмотки.

Это поле, как видно из уравнения (1.17), является пульсирующим, то есть его максимум не перемещается по окружности статора, а возможен только на оси фазы.

Применив известную тригонометрическую формулу о произведении двух синусоидальных функций, преобразуем выражение (1.17) к виду

$$F_X = 0,5F_M \sin(\omega t - \pi x / \tau) + 0,5F_M \cos(\omega t + \pi x / \tau) = F'_X + F''_X. \quad (1.18)$$

Каждый из членов правой части этого выражения F'_X и F''_X представляет собой уравнение вращающейся волны мдс, поскольку максимум ее перемещается в пространстве и появляется последовательно во всех точках внутренней поверхности статора. Таким образом, пульсирующее магнитное поле, создаваемое, например, однофазной обмоткой, синусоидально распределенное в пространстве, можно представить в виде суммы двух магнитных полей, вращающихся в противоположных направлениях. В каждом из этих полей максимальное значение мдс в различные моменты времени остаются неизменными. Поэтому, если каждое из них представить в виде пространственного вектора мдс \vec{F} , то конец его будет описывать окружность. В качестве положительного направления принимается направление вращения по часовой стрелке.

Координату точки x , в которой мдс F'_X максимальна и равна $0,5F_M$, можно получить, положив $\sin(\omega t - \pi x / \tau) = 1$. Тогда

$$x = \tau(\omega t - \pi / 2) / \pi.$$

Линейная скорость перемещения волны мдс:

$$V = dx/dt = \omega \tau / \pi = 2f\tau,$$

то есть за один период магнитное поле проходит пару полюсов.

Скорость вращения магнитного поля:

$$n_1 = 60V / \pi D = 60f / p,$$

где p - число пар полюсов обмотки.

Отметим здесь, что количество пар полюсов определяется конструктивными особенностями машины и способом изготовления ее обмоток.

В двухфазной машине на статоре расположены две фазные обмотки (фазы) AX и BV . Пусть оси этих обмоток в общем случае смещены в пространстве на угол α (рис.1.9, а), а синусоидальные токи, протекающие по ним, и соответствующие векторы мдс F_{XA} и F_{XB} сдвинуты во времени на некоторый угол β .

Фазы AX и BV каждая создает свое пульсирующее магнитное поле, синусоидально распределенное в пространстве. Мдс этих фаз, действующее

щие в любой точке x воздушного зазора, могут быть записаны как

$$F_{XA} = F_{MA} \cdot \sin(\omega t) \cos(\pi x / \tau) ;$$

$$F_{XB} = F_{MB} \cdot \sin(\omega t + \beta) \cos(\pi x / \tau + \alpha) .$$

После несложного тригонометрического преобразования получаем:

$$F_{XA} = 0,5 F_{MA} \cdot \sin(\omega t - \pi x / \tau) + 0,5 F_{MA} \sin(\omega t + \pi x / \tau) = F'_{XA} + F''_{XA} ; \quad (1.19)$$

$$F_{XB} = 0,5 F_{XB} \sin(\omega t + \beta - \pi x / \tau - \alpha) + 0,5 F_{XB} \sin(\omega t + \beta + \pi x / \tau + \alpha) = F'_{XB} + F''_{XB} .$$

В выражении (1.19) складываются или вычитаются временные и пространственные углы, то есть они становятся эквивалентными. При этом электрические градусы связаны с геометрическими соотношением

$$\alpha^{\circ}_{эл} = p \alpha^{\circ}_{геом},$$

где p - число пар полюсов.

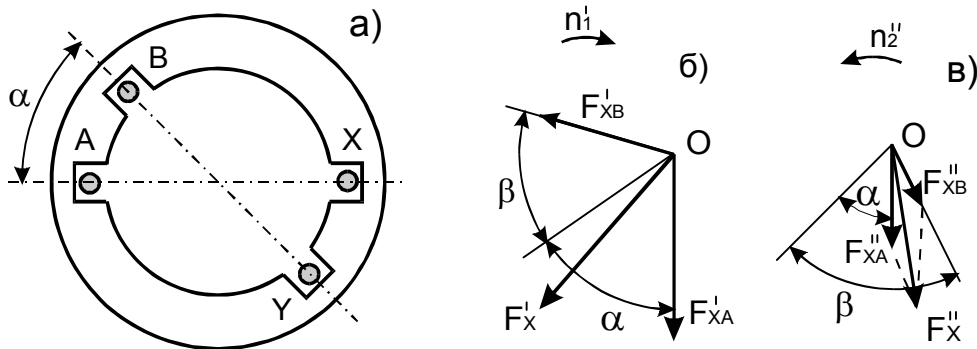


Рис. 1.9. Схема магнитной системы несимметричной двухфазной машины и векторные диаграммы мдс при несимметричном питании

Результирующее магнитное поле, создаваемое действием двух обмоток, получим путем сложения составляющих мдс, вращающихся по часовой стрелке:

$$F'_{XA} = 0,5 F_{MA} \cdot \sin(\omega t - \pi x / \tau) ,$$

$$F'_{XB} = 0,5 F_{MB} \cdot \sin(\omega t + \beta - \pi x / \tau - \alpha) , \quad (1.20)$$

а также вращающихся против часовой стрелки

$$F''_{XA} = 0,5 F_{MA} \sin(\omega t + \pi x / \tau) ,$$

$$F''_{XB} = F_{MB} \sin(\omega t + \beta + \pi x / \tau + \alpha) . \quad (1.21)$$

На рисунке 1.9,б показано сложение векторов F'_{XA} и F'_{XB} , вращающихся по часовой стрелке, а на рисунке 1.9,в - векторов F''_{XA} и F''_{XB} , вращающихся против часовой стрелки.

Суммарные мдс полей, вращающихся в противоположные стороны, то есть, $F'_X = F'_{XA} + F'_{XB}$ и $F''_X = F''_{XA} + F''_{XB}$, в общем случае не равны по величине, поэтому результирующее поле будет не пульсирующим, а вращающимся. В этом поле максимальное значение результирующей мдс в различные моменты времени, то есть в различных точках пространства, не остается постоянным, как при круговом поле. Такое поле называется

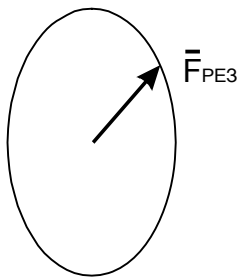


Рис. 1.10. Годограф пространственного вектора мдс

эллиптическим, так как в нем пространственный вектор результирующей магнитодвижущей силы F_{PE3} описывает эллипс (рис. 1.10).

В двухфазной машине можно получить и круговое вращающееся поле. При этом должна быть произведена взаимная компенсация одной из пар мдс F'_{XA} и F'_{XB} или F''_{XA} и F''_{XB} . Анализируя выражения (1.20), (1.21), можно видеть, что последнее имеет место, когда указанные мдс равны по амплитуде ($F_{MA} = F_{MB}$), но противоположны по фазе

($\alpha + \beta = \pi$).

Наилучшим для двухфазной машины является случай, когда ее фазы (оси обмоток AX и BY) смещены в пространстве на угол $\alpha = \pi/2$, а токи фаз сдвинуты во времени на угол $\pi/2$, то есть $\alpha = \beta = 90^\circ$. При этом составляющие мдс, например F'_{XA} и F'_{XB} взаимно компенсируются, а составляющие F''_{XA} и F''_{XB} складываются арифметически.

Таким образом, учитывая, что мдс обмотки $F = wI$, где w - число витков обмотки, а I - протекающий по ней ток, можно записать условия, при одновременном выполнении которых в двухфазной машине при питании ее синусоидальным напряжением, существует круговое вращающееся магнитное поле:

$$1) I_{Am} = I_{Bm}, \quad 2) \alpha = \beta = \pi/2. \quad (1.22)$$

Первое условие можно переписать в виде:

$$\frac{U_{Am}}{w_1} = \frac{U_{Bm}}{w_2}, \quad (1.23)$$

где U_{Am} , U_{Bm} - амплитуда напряжений, питающих обмотки; w_1 , w_2 - количество витков обмоток.

Отметим, что *симметричной двухфазной системой напряжений* называют систему, состоящую из двух напряжений, которые равны по амплитуде и сдвинуты по фазе во времени на четверть периода. Если не выполняется хотя бы одно из этих условий, то система напряжений будет несимметричной.

Симметричной двухфазной машиной по ее исполнению называют машину, имеющую на статоре две обмотки, которые смещены в пространстве на 90° , имеют одинаковое количество эффективных витков, занимают равное число одинаковых пазов, изготовлены из провода одного диаметра и имеют одинаковое сопротивление. Если не выполняется хотя бы одно из названных условий, то машина по своему исполнению будет несимметричной.

Направление вращающихся магнитных полей определяется чередованием максимумов мдс в фазах. Поэтому в двухфазной машине для из-

менения вращения магнитного поля достаточно переключить провода, присоединяющие к сети одну из фаз обмотки.

Скорость вращения магнитного поля

$$n_1 = 60f/p \text{ (об/мин)}, \quad (1.24)$$

где f - частота питающего напряжения (Гц), p - число пар полюсов обмотки.

На практике двухфазные электрические машины выполняются с двумя независимыми обмотками, расположенными на статоре, сдвинутыми в пространстве на 90° и имеющими, как правило, равное количество витков.

Тогда условием получения кругового вращающегося магнитного поля является равенство амплитуд питающих обмотки напряжений и сдвиг их на 90° электрических градусов.

В общем случае, то есть при неравенстве $U_{Am}/w_1 \neq U_{Bm}/w_2$, либо $\beta \neq 90^\circ$, либо того и другого вместе, в двухфазной электрической машине существует эллиптическое магнитное поле, которое для удобства разлагают на два круговых - поле прямой последовательности, вращающееся в ту же сторону, что и результирующее поле, и поле обратной последовательности, вращающееся в противоположную сторону. Прямое поле создает полезный вращающий момент, а обратное – тормозящий.

Равенство нулю намагничивающей силы одной из фаз (это происходит при $U_A=0$ или $U_B=0$) или равенство нулю угла временного сдвига β , приводит к тому, что поле машины становится пульсирующим; эллипс вырождается в линию.

В трехфазной машине имеется три группы независимых обмоток с числом витков w_1 , w_2 и w_3 . При питании их синусоидальными напряжениями с амплитудами U_{Am} , U_{Bm} , U_{Cm} и некоторым фазовым сдвигом друг относительно друга каждая обмотка создает свое пульсирующее магнитное поле. Легко показать, что в этом случае также можно получить вращающееся магнитное поле, в том числе и круговое. Условием получения кругового поля при этом является равенство

$$U_{Am}/w_1 = U_{Bm}/w_2 = U_{Cm}/w_3, \quad (1.25,а)$$

а также фазовый сдвиг между фазными напряжениями в 120° :

$$\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ. \quad (1.25,б)$$

Нарушение любого из этих условий приводит к появлению эллиптического вращающегося поля.

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы:

- однофазная обмотка при питании переменным синусоидальным напряжением создает пульсирующее магнитное поле, которое можно представить как сумму двух круговых полей, вращающихся в противоположные стороны;

- двухфазная система обмоток при питании переменными синусоидальными напряжениями создает в общем случае эллиптическое вращаю-

щееся магнитное поле. При выполнении условий (1.22) это поле является круговым;

- трехфазная система обмоток при питании переменными синусоидальными напряжениями также в общем случае создает эллиптическое вращающееся магнитное поле, которое при выполнении условий (1.25) является круговым.

1.6. Механическая характеристика асинхронного двигателя

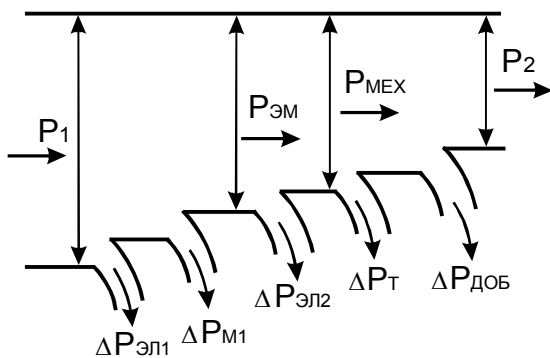


Рис.1.11. Энергетическая диаграмма асинхронной машины

фазе; φ - коэффициент мощности.

$\Delta P_{ЭЛ1}$, $\Delta P_{М1}$ – электрические и магнитные потери в статоре.

$\Delta P_{ЭЛ2}$ – электрические потери в короткозамкнутой обмотке ротора.

$\Delta P_{Т}$, $\Delta P_{ДОБ}$ – механические и добавочные потери.

$P_{ЭМ}$ – передаваемая от статора к ротору электромагнитная мощность.

$P_{МЕХ}$ – механическая мощность.

P_2 – полезная выходная мощность двигателя.

Из рис.1.11 запишем:

$$P_{ЭМ} = P_1 - \Delta P_{ЭЛ1} - \Delta P_{М1};$$

$$P_{МЕХ} = P_{ЭМ} - \Delta P_{ЭЛ2};$$

$$P_2 = P_{МЕХ} - \Delta P_{Т} - \Delta P_{ДОБ};$$

$$\Delta P_{ЭЛ2} = P_{ЭМ} - P_{МЕХ}. \quad (1.26)$$

Известно, что

$$P_{ЭМ} = M\omega_1, \quad P_{МЕХ} = M\omega_2, \quad (1.27)$$

где ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения магнитного поля и ротора; M – момент двигателя.

Подставляя (1.27) в (1.26), находим:

$$\Delta P_{ЭЛ2} = M\omega_1 - M\omega_2 = M\omega_1(\omega_1 - \omega_2) / \omega_1 = M\omega_1 s,$$

где $s = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1$ – скольжение ротора.

Далее получаем:

$$M = \Delta P_{ЭЛ2} / (\omega_1 s) = M_1 I_1^2 R_2 / (\omega_1 s) = P_{ЭМ} / \omega_1, \quad (1.28)$$

$$s = \Delta P_{эл2} / (M\omega_1) = \Delta P_{эл2} / P_{эм}. \quad (1.29)$$

Отметим, что величина $P_{эм}$ зависит от конструктивных особенностей двигателя, в частности от его габаритов и числа пар полюсов, а также от параметров напряжения питания.

Подставляя приближенное значение тока в выражение (1.28), получаем уравнение так называемой механической характеристики асинхронного двигателя:

$$M \approx \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 s \left[(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}, \quad (1.30)$$

где R_1, X_1 – активное и индуктивное сопротивления статорных обмоток; R_2', X_2' – активное и индуктивное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора.

Задаваясь значениями s при известных параметрах двигателя можно построить зависимость $M=M(s)$, являющуюся механической характеристикой двигателя.

Критическим называют скольжение $s_{кр}$, при котором двигатель развивает максимальный момент. Найти его можно, исследовав на максимум выражение (1.30). Дифференцируя (1.30) по s (при этом пренебрегаем величиной R_1 в знаменателе) и приравнивая результат нулю, находим

$$s_{кр} = R_2' / (X_1 + X_2') \quad (1.31)$$

и соответствующий максимальный момент:

$$M_{MAX} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (1.32)$$

Как видим, критическое скольжение зависит от параметров обмоток ротора, в частности от их активного сопротивления. Максимальное же значение момента, развиваемое асинхронным двигателем, не зависит от R_2 . Сказанное иллюстрируется рис. 1.12, где изображены механические характеристики асинхронного двигателя в координатах M, s (рис 1.12,а), и

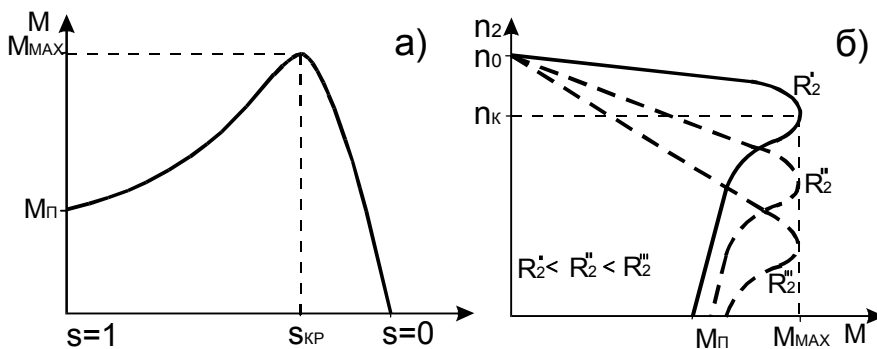


Рис. 1.12. Механическая характеристика асинхронного двигателя

координатах M, n_2 (рис 1.12,б) при круговом вращающемся поле. При увеличении активного сопротивления ротора максимум момента, не изменяясь по величине, смещается, как показано на рисунке пунктирными линиями.

сунке пунктирными линиями.

Таким образом, увеличивая критическое скольжение, можно добиться, чтобы механическая характеристика асинхронного двигателя при круговом вращающемся поле была достаточно линейной.

Оценим зависимость коэффициента полезного действия асинхронного двигателя от скольжения. Представим его КПД в виде

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_{ЭМ} / P_1)(P_2 / P_{ЭМ}) = \eta_1 \eta_2,$$

где η_1, η_2 - КПД статора и ротора соответственно.

Поскольку

$$\eta_2 = P_2 / P_{ЭМ} = (P_{ЭМ} - \Delta P_{ЭЛ2} - \Delta P_T - \Delta P_{ДОБ}) / P_{ЭМ},$$

то справедливо неравенство

$$\eta_2 < \frac{P_{ЭМ} - \Delta P_{ЭЛ2}}{P_{ЭМ}} < 1 - \frac{\Delta P_{ЭЛ2}}{P_{ЭМ}} < 1 - s.$$

Следовательно, $\eta < \eta_2 < 1 - s$.

Таким образом, для работы асинхронного двигателя с высоким КПД необходимо, чтобы он имел небольшое скольжение.

1.7. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока

При неподвижном роторе и подключении якорной обмотки с сопротивлением $R_Я$ к источнику питания достаточно большой мощности ($R_{ИП} \approx 0$) по цепи якоря протекает ток

$$I_Я = U / R_Я, \quad (1.33)$$

где U – напряжение источника питания.

При вращающемся со скоростью ω якоре в его проводниках наводится ЭДС, пропорциональная скорости вращения, которая называется противоэлектродвижущей силой, так как она направлена против приложенного напряжения:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (1.34)$$

где C_E – коэффициент противоэдс.

Следовательно, во вращающемся якоре ток равен

$$I_Я = (U - E) / R_Я. \quad (1.35)$$

Из приведенных выражений следует, что при постоянном напряжении на якоре максимальный ток протекает по его обмотке при неподвижном роторе. Этот режим называется режимом короткого замыкания. Противоэлектродвижущая сила E является автоматическим регулятором тока, потребляемого двигателем от источника питания. Действительно, при увеличении нагрузки на двигатель скорость его вращения уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС и к увеличению тока, потребляемого двигателем.

Из формулы (1.35) следует уравнение электродвижущей силы двигателя

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (1.36)$$

Умножая правую и левую части уравнения эдс на ток в якоре $I_{\text{я}}$, получим уравнение мощностей

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}, \quad (1.37)$$

где $UI_{\text{я}} = P_1$ – мощность, потребляемая двигателем из сети; $I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ – потери в цепи якоря; $EI_{\text{я}} = P_M$ – полезная механическая мощность двигателя.

Из выражений (1.34) и (1.35) может быть определена зависимость скорости вращения якоря от напряжения, приложенного к двигателю,

$$\omega = (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / (C_E \cdot \Phi_B), \quad (1.38)$$

где ω – скорость вращения якоря, 1/с; U – напряжение, приложенное к якору, В; $I_{\text{я}}$ – ток, протекающий по якору, А; $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря, Ом; $C_E = Np / (2\pi a)$ – коэффициент противоэдс, В·с/рад; p – число пар полюсов в двигателе; N – число активных проводников якоря; a – число пар параллельных ветвей в обмотке якоря; Φ_B – поток возбуждения.

Коэффициент C_E зависит только от конструктивных параметров двигателя и является для данной машины постоянной величиной. При изменении на целое число количества пар полюсов системы возбуждения коэффициент C_E и, следовательно, скорость вращения ротора изменяется обратно пропорционально в соответствующее количество раз.

Из механики известно, что $P_{\text{мех}} = M \cdot \omega$, где M – полный момент вращения двигателя. Поэтому с учетом выражения (1.37) получим выражение для момента, развиваемого двигателем,

$$M = EI_{\text{я}} / \omega = C_M I_{\text{я}} \Phi, \quad (1.39)$$

где $C_M = Np / (2\pi a)$ – коэффициент момента, постоянная величина для данной машины.

Важно отметить, что коэффициенты момента и противоэдс в точности равны между собой. Заметим, что они равны друг другу, если определены в одной системе единиц. В теории электрических машин

$$C_E = C_M = C_{\text{ДВ}},$$

а коэффициент $C_{\text{ДВ}}$ называется коэффициентом (постоянной) двигателя.

Коэффициент $C_{\text{ДВ}}$ может быть определен по паспортным данным двигателя, в котором указываются номинальные данные $U_{\text{НОМ}}$, $I_{\text{НОМ}}$, $\omega_{\text{НОМ}}$. Определяя $C_{\text{ДВ}}$ из выражения (1.38), получим

$$C_{\text{ДВ}} = (U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_{\text{я}}) / \omega_{\text{НОМ}}.$$

Выражения (1.38) и (1.39), определяющие изменение скорости вращения якоря от подведенного к нему напряжения $\omega = \omega(U)$ и изменение момента двигателя от скорости его вращения $M = M(\omega)$, называются соответственно *регулирующей* и *механической* характеристиками двигателя.

Глава 2. Силовые (неуправляемые) микродвигатели

Как уже отмечалось выше, выделение силовых двигателей в отдельную категорию, хотя и общепринято, несколько условно, поскольку в конечном итоге все двигатели, производя преобразование электрической энергии в механическую, в той или иной степени выполняют силовые функции. Термин "неуправляемые" также не всегда корректен, так как иногда от "силовых" по назначению двигателей требуется высокая стабильность скорости вращения, не обеспечиваемая их собственными характеристиками. Тогда к ним применяют частный случай управления – стабилизацию скорости. Последнее осуществляют с помощью специальных механических или электронных устройств с охватом двигателя обратной связью, что делает его фактически управляемым двигателем. Имея в виду эти особенности терминологии, в дальнейшем будем пользоваться общепринятыми классификационными обозначениями, подразумевая под силовыми двигателями такие, которые предназначены, как правило, для вращения нагрузки с постоянной скоростью и не предназначены для обработки каких-либо сигналов управления.

Основными общими требованиями, которые предъявляются к силовым микродвигателям систем автоматики, являются:

- высокий коэффициент полезного действия;
- высокая надежность;
- малые масса и габариты;
- низкая стоимость.

В ряде случаев, в зависимости от конкретных условий эксплуатации и назначения системы, в которой двигатель используется, могут предъявляться дополнительные требования, например, отсутствие радиопомех, высокая стабильность скорости вращения, надежная работа при любом положении относительно плоскости горизонта, работа в условиях пониженного давления, повышенной влажности и др.

Двигатели любых типов оцениваются по их характеристикам: пусковым, регулировочным и рабочим. Особое место среди рабочих характеристик занимает механическая характеристика двигателя.

В настоящее время в качестве силовых широко применяются как двигатели переменного, так и двигатели постоянного тока.

2.1 Силовые микродвигатели переменного тока

При использовании любых неуправляемых двигателей всегда применяется только один источник питания. В качестве силовых двигателей

переменного тока получили распространение двигатели, использующие однофазные либо трехфазные источники питания, называемые соответственно *однофазными* и *трехфазными* двигателями. Это вызвано тем, что именно такие источники питания легче всего реализуются на практике.

2.1.1. Трехфазные асинхронные двигатели

В трехфазном асинхронном двигателе трехфазная статорная обмотка подключена к источнику переменного тока, для которого с точностью до погрешностей выполняются условия получения кругового вращающегося магнитного поля (1.25). Статорные обмотки двигателя при этом могут быть соединены в треугольник или звезду. Механическая характеристика такого двигателя имеет вид (1.30).

Стремление увеличить коэффициент полезного действия двигателя диктует необходимость снижения величины активного сопротивления роторной обмотки, вследствие чего максимум момента имеет место при относительно высоких скоростях вращения (см. выражение (1.31)). Роторная обмотка силовых асинхронных двигателей за редким исключением выполняется в виде беличьей клетки.

Рассмотрим факторы, влияющие на устойчивость работы асинхронного двигателя. При этом под устойчивостью будем понимать способность двигателя восстанавливать установившуюся скорость вращения при кратковременных возмущениях (напряжения питания, изменениях нагрузки и т.п.).

Рассмотрим условие равновесия моментов, приложенных к ротору двигателя

$$M = M_{CT} + J \cdot d\omega_2 / dt ,$$

где M – электромагнитный момент двигателя; M_{CT} – статический момент нагрузки; $J \cdot d\omega_2 / dt$ – динамический момент, зависящий от момента инерции вращающихся масс J и ускорения ротора $d\omega_2 / dt$.

При $M = M_{CT}$ ускорение ротора

$$d\omega_2 / dt = (M - M_{CT}) / J = 0, \quad (2.1)$$

то есть ротор вращается с установившейся скоростью. Если $M > M_{CT}$, ротор будет ускоряться, а при $M < M_{CT}$ – замедляться.

Устойчивость зависит от конкретных условий эксплуатации, в частности от формы механической характеристики двигателя и приводимого им во вращение механизма.

На рис.2.1 для примера приведено несколько типичных механических характеристик механизмов.

Рассмотрим работу асинхронного двигателя, приводящего во вращение механизм с падающей механической характеристикой (кривая 3 на

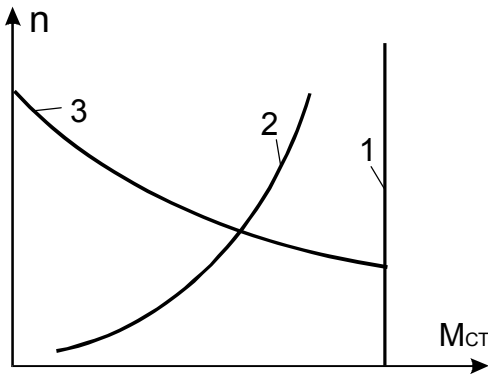


Рис.2.1. Механические характеристики некоторых механизмов

рис. 2.1). В этом случае условие $M=M_{CT}$ выполняется в точках A и B при значениях скорости вращения n_A и n_B . В точке B при малейшем изменении момента нагрузки и возникающем в результате этого отклонении скорости вращения от установившегося значения появляется избыточный замедляющий или ускоряющий момент $\pm(M - M_{CT})$, увеличивающий это отклонение. Например, при случайном увеличении момента, в соответствии с выражением (2.1), ротор двигателя начинает замедляться.

При работе двигателя в режиме, соответствующем точке B , то есть на части $M_{MAX}-\Pi$ характеристики 1 рис. 2.2, это приведет к уменьшению

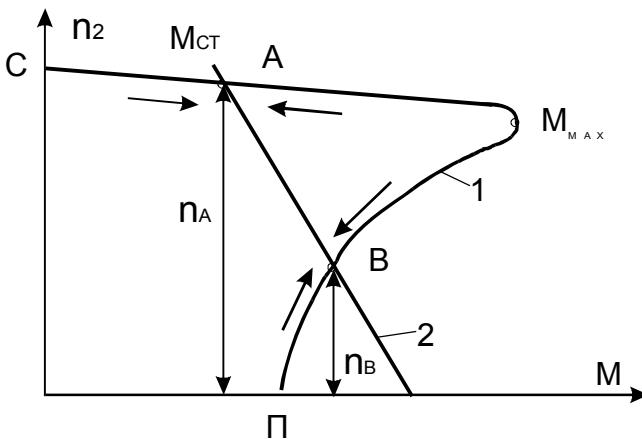


Рис.2.2. К определению статической устойчивости асинхронного двигателя

электромагнитного момента M , то есть к еще большему возрастанию разности $(M - M_{CT})$. В результате этого ротор будет продолжать замедляться до полной остановки. При случайном уменьшении статического момента ротор начнет ускоряться. Это приведет к дальнейшему увеличению момента M и еще большему ускорению до тех пор, пока двигатель не перейдет в режим работы, соответствующий

точке A . В точке A режим работы двигателя будет устойчивым, так как при случайном увеличении момента M_{CT} и замедлении ротора электромагнитный момент двигателя M будет возрастать. Когда момент M станет равен новому значению M_{CT} , двигатель снова будет работать с установившейся, но несколько меньшей скоростью вращения.

Таким образом, асинхронный двигатель при работе на части $C - M_{MAX}$ механической характеристики обладает свойством внутреннего саморегулирования, благодаря которому его вращающий момент автоматически регулируется по закону $M=M_{CT}$. Регулирование осуществляется за счет увеличения или уменьшения скорости вращения ротора. Сравнивая условия работы двигателя в точках A и B , можно сказать, что работа двигателя устойчива, если с увеличением скорости вращения статический момент уменьшается медленнее, чем электромагнитный момент двигателя:

$$dM/dn_2 < dM_{CT}/dn_2. \quad (2.2)$$

Это условие выполняется практически для всех механизмов с па-

дающими характеристиками $M_{CT}=f(n)$ и с характеристиками, не зависящими от скорости вращения (кривые 1 и 3 рис. 2.2), если двигатель работает на участке $C - M_{MAX}$ механической характеристики. Диапазон изменения скольжения при этом составляет $0 < s < s_{кр}$. При $s > s_{кр}$, то есть на части $M_{MAX} - II$ механической характеристики, устойчивая работа двигателя становится невозможна.

При работе двигателя с механизмом, имеющим так называемую вентиляторную характеристику (кривая 2 на рис. 2.1), устойчивая работа возможна и на части $M_{MAX} - II$ механической характеристики, то есть при $s > s_{кр}$. Однако при этом в обмотках статора резко возрастают потери и резко снижается коэффициент полезного действия двигателя.

Если в эксплуатации возможны не только кратковременные небольшие изменения статического момента нагрузки, но и его существенное увеличение при резких изменениях режима работы, то при работе двигателя при скольжении, меньшем критического, но близкого к нему, случайная перегрузка двигателя может привести к его остановке. Поэтому при больших перегрузках устойчивость работы двигателя обеспечивают выбором номинального момента $M_{НОМ} < M_{MAX}$ (напомним, что под номинальным моментом понимается момент, развиваемый при номинальной скорости вращения). Отношение $M_{MAX}/M_{НОМ}$ характеризует перегрузочную способность двигателя по моменту γ_m . Однако увеличение перегрузочной способности асинхронного двигателя ведет к возрастанию его габаритов и массы, либо к снижению энергетических показателей.

Большое значение для обеспечения устойчивой работы асинхронных двигателей имеет качество энергоснабжения. Вращающий момент асинхронного двигателя зависит от квадрата амплитуды питающего напряжения. Поэтому даже незначительное уменьшение напряжения сказывается на величине максимального момента, что может вызвать остановку двигателя.

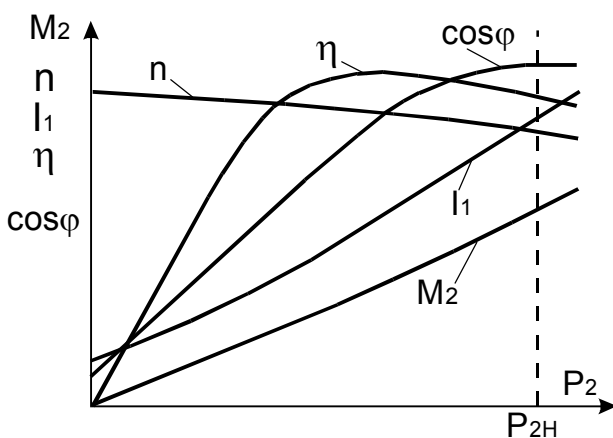


Рис. 2.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Номинальными данными двигателя называют данные, характеризующие его работу в режиме, для которого он предназначен заводом-изготовителем.

Под рабочими характеристиками двигателя понимают зависимости скорости вращения n_2 (или скольжения s), момента на валу M_2 , тока статора I_1 , коэффициента полезного действия η и $\cos\phi$ от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ и

$f_1 = \text{const}$ (рис. 2.3).

Скорость вращения двигателя n_2 в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки изменяется незначительно, так как при проектировании двигателей с целью уменьшения потерь мощности в роторе стремятся, чтобы скольжение при номинальном режиме не превышало 0,02...0,06. Поэтому такую скоростную характеристику называют "жесткой".

Зависимость нагрузочного момента M_2 от мощности на валу двигателя определяется соотношением

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = (30 / \pi n_2) / P_2.$$

Так как n_2 изменяется незначительно, то и характеристика $M_2 = f(P_2)$ близка к линейной.

При холостом ходе коэффициент мощности $\cos\varphi$ очень мал, так как двигатель потребляет намагничивающий ток I_0 , отстающий от напряжения на угол, примерно равный 90° . С увеличением нагрузки $\cos\varphi$ возрастает и при номинальной нагрузке находится в пределах 0,6...0,8 в зависимости от мощности двигателя.

Зависимость коэффициента полезного действия η от полезной мощности имеет вид, обычный для всех электрических машин, и достигает наибольшего значения при номинальной нагрузке. Коэффициент полезного действия асинхронных силовых микромашин обычно составляет 0,4...0,65. При этом двигатели большей мощности имеют больший коэффициент полезного действия.

При пуске двигателя в ход по возможности должны удовлетворяться основные требования: процесс пуска должен осуществляться без сложных пусковых устройств; пусковой момент должен быть достаточно большим, а токи – по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляют и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используют двигатели - необходимость плавного пуска, максимального пускового момента, малого времени разгона и пр.

Для микродвигателей в большинстве случаев применяют прямой пуск, то есть непосредственное включение двигателя в сеть под номинальное напряжение. При таком способе пуска двигатель потребляет большой пусковой ток и развивает небольшой пусковой момент. Двигатели малой мощности обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмоток статора к сети возникающие пусковые токи не создавали чрезмерных электродинамических усилий и превышения температуры, опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов двигателя.

В целях ограничения пускового тока иногда применяют пуск при пониженном напряжении, но при этом значительно уменьшается пусковой момент, который пропорционален квадрату подведенного фазного напряжения. Фактически такой метод можно использовать только при пуске

двигателя без нагрузки.

Для реверсирования, то есть изменения направления вращения ротора, необходимо изменить направление вращения магнитного поля. В трехфазной машине это достигается изменением чередования фаз, для чего переключают два провода, подводящие ток из сети, к двум любым фазам обмотки статора.

В случае необходимости регулирования скорости вращения можно осуществить изменением частоты тока, питающего двигатель. При этом способе для каждого двигателя необходим специальный преобразователь частоты.

Регулирование скорости вращения трехфазных асинхронных микро-двигателей нормального исполнения путем изменения величины питающего напряжения затруднено, так как при этом резко уменьшается максимальный момент. Критическое скольжение, определяющее зону устойчивой работы двигателя, при этом остается неизменным: $s_{кр}=0,1\dots 0,2$. Как будет показано ниже, этот способ регулирования скорости вращения находит широкое применение в управляемых (исполнительных) асинхронных двигателях, имеющих повышенное сопротивление ротора.

2.1.2. Однофазные асинхронные двигатели

Как было показано в главе 1, однофазный переменный ток, проходя по однофазной обмотке, создает неподвижный поток, изменяющийся во времени, а не круговой вращающийся поток, как это имеет место в трехфазных двигателях при симметричном питании. Это пульсирующее поле можно разложить на два идентичных круговых поля, вращающихся в противоположных направлениях и имеющих одинаковые скорости вращения: $n_{1np}=n_{1обр}=n_1$. Поскольку свойства асинхронного двигателя при круговом вращающемся поле подробно рассмотрены в предыдущем параграфе, анализ свойств однофазного двигателя можно свести к рассмотрению совместного действия каждого из вращающихся полей. Поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, называют прямым; поле обратного направления – обратным. Электромагнитные моменты $M_{ПР}$ и $M_{ОБР}$, образуемые прямым и обратным полями, направлены в противоположные стороны, а результирующий момент однофазного двигателя $M_{PEЗ}$ равен разности моментов при одной и той же скорости вращения ротора. При этом можно ввести понятие скольжения ротора – относительно прямого потока $s_{np}=(n_{1np}-n_2)/n_{1np}=(n_1-n_2)/n_1=1-n_2/n_1$ и скольжение ротора относительно обратного потока $s_{обр}=1+n_2/n_1$. Очевидно, что сумма

$$s_{np}+s_{обр}=2.$$

Во время пуска на ротор действуют два равных и противоположно направленных момента ($M_{PEЗ}=0$), следовательно, начальный (пусковой)

вращающий момент указанного двигателя равен нулю.

Если ротор двигателя (с критическим скольжением менее 1) начать вращать каким-либо способом в сторону одного из вращающихся магнитных полей, то он будет продолжать вращаться. Это объясняется тем, что во вращающемся роторе частота тока от прямого и обратного поля неодинаковы. Действительно, частота от прямого поля $f_{np} = fs_{np}$, а частота тока от обратного поля $f_{обр} = (2 - s_{np})f$. Так как частота тока $f_{обр}$ больше f_{np} , то соответственно повышенной частоте увеличивается индуктивное сопротивление ротора, а момент, создаваемый обратным полем, уменьшается.

Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя может быть получена путем сложения вращающихся моментов, развиваемых прямым и обратным полями (рис. 2.4).

Момент M_{OBR} на рис. 2.4 показан ниже оси абсцисс, так как он на-

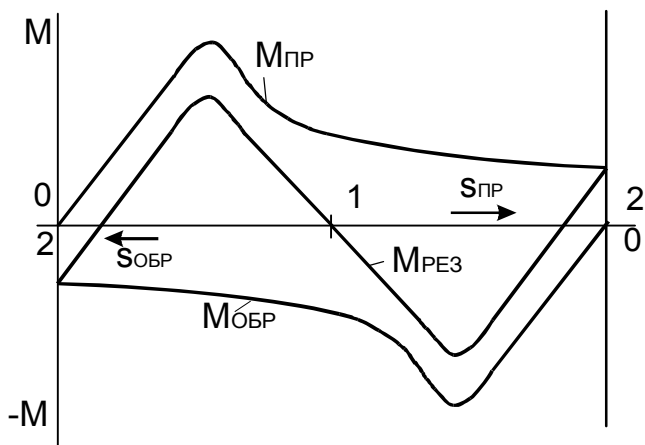


Рис. 2.4. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя

правлен встречно относительно момента $M_{ГП}$, создаваемого прямым полем. Особенностью однофазного двигателя является то, что его ротор при критическом скольжении исходных механических характеристик $s_k < 1$ может вращаться в обе стороны. Направление вращения зависит от того, в какую сторону ротор приводится во вращение из неподвижного состояния силой извне. Однофазный асинхронный двигатель, таким образом,

при $s_k < 1$ не имеет тормозного режима. Ему присущи только двигательный и генераторный режимы, а тормозной момент отсутствует.

В однофазном двигателе, по сравнению с трехфазным, электрические потери выше, коэффициент полезного действия ниже, ток холостого хода выше, коэффициент мощности ниже, максимальный вращающий момент меньше, что объясняется действием обратного поля.

Для создания в однофазном двигателе начального вращающего момента на его статоре располагают дополнительную (пусковую) обмотку, сдвинутую в пространстве относительно рабочей обмотки на 90 градусов. Обычно под эту обмотку отводится 1/3 статорного пространства.

Для создания сдвига по фазе между токами в пусковой и рабочей обмотках последовательно с пусковой обмоткой на время пуска включается фазосдвигающий элемент. Возникающее вращающееся магнитное поле создает в двигателе начальный вращающий момент. После окончания пуска дополнительная обмотка отключается от сети, и в дальнейшем двигатель работает как однофазный (рис. 2.5).

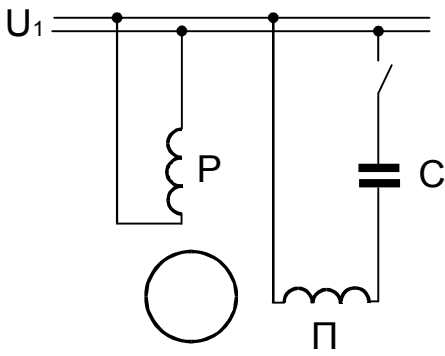


Рис.2.5. Схема однофазного асинхронного двигателя с конденсаторным пуском

В качестве фазосмещающих элементов может быть использовано активное сопротивление, индуктивность или емкость.

Сравнение свойств различных фазосдвигающих элементов (рис. 2.6) показывает, что сдвиг токов в обмотках на 90° может быть обеспечен только при помощи емкости.

Действительно, если отсутствуют фазосдвигающие элементы (рис. 2.6,а), то токи в обеих обмотках совпадают по фазе и отстают от напряжения на угол $\varphi_A = \varphi_B$.

При включении в цепь пусковой обмотки активного сопротивления (рис. 2.6,б) ток I_B будет приближаться по фазе к напряжению U . Если ток даже совпадает по фазе с напряжением, то и тогда

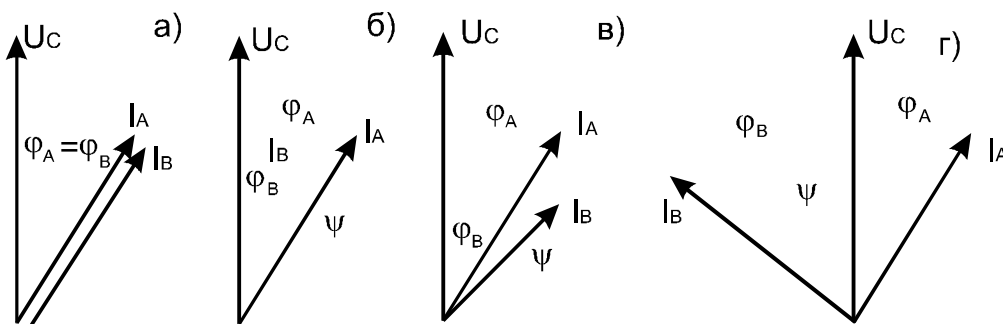


Рис.2.6. Сравнение свойств фазосдвигающих элементов.

гда угол сдвига между токами ψ не превысит угол φ_A , то есть будет меньше 90° .

Если

включить в цепь пусковой

обмотки индуктивность (рис. 2.6,в), то даже при угле $\varphi_B = 90^\circ$ угол сдвига между токами ($\psi = 90^\circ - \varphi_A$) не может достичь 90° .

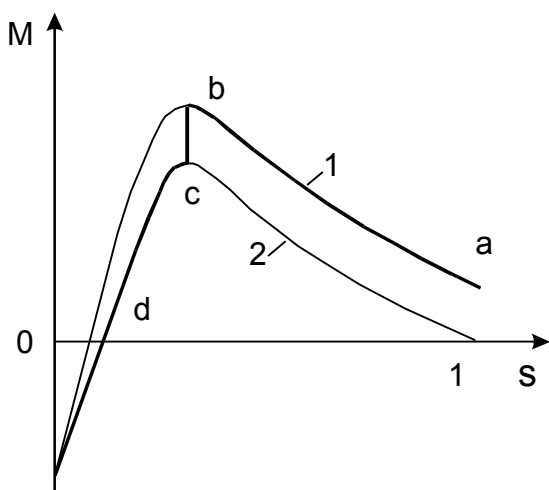


Рис.2.7. Механическая характеристика асинхронного двигателя с пусковой емкостью

При включении в цепь пусковой обмотки емкости (рис. 2.6,г) ток I_B будет опережать напряжение U и легко добиться сдвига токов в обмотках на 90° . Следовательно, емкость является наилучшим фазосмещающим элементом. Выбирая определенным образом емкость фазосдвигающего конденсатора, можно получить режим работы при пуске, близкий к симметричному, то есть получить круговое вращающееся поле.

На рис. 2.7 показана механическая характеристика для двигателя при включенной (кривая 1) и выключенной (кривая 2) пусковой обмотке. Пуск

двигателя в ход осуществляется на части ab характеристики 1; в точке b пусковая обмотка выключается, и в дальнейшем двигатель работает на части cd характеристики 2.

Поскольку включение второй обмотки существенно улучшает механическую характеристику двигателя, в некоторых случаях применяют однофазные двигатели, в которых обмотки A и B включены все время (рис. 2.8). Такие двигатели называют конденсаторными.

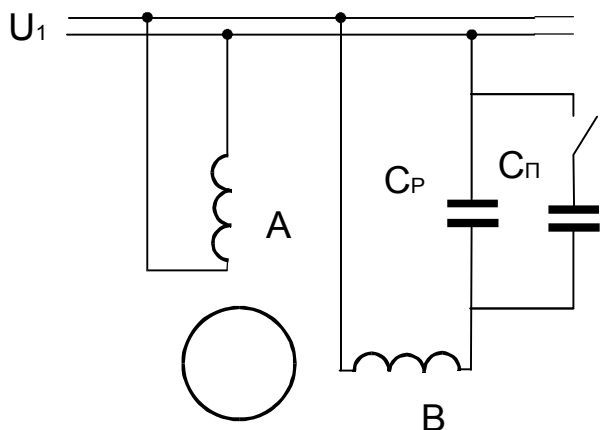


Рис. 2.8. Схема конденсаторного асинхронного двигателя

Обе обмотки конденсаторных двигателей занимают, как правило, одинаковое число пазов и имеют одинаковую мощность. При пуске конденсаторного двигателя для увеличения пускового момента целесообразно иметь увеличенную емкость. В этом случае после разгона двигателя часть конденсаторов отключают, чтобы при номинальном режиме обеспечить работу двигателя в условиях, близких к работе при круговом вращающемся поле.

Конденсаторные двигатели по сравнению с обычными однофазными обладают большим максимальным моментом и более высоким коэффициентом мощности. Если в конденсаторном двигателе поле близко к круговому, то он по своим рабочим свойствам приближается к трехфазному асинхронному двигателю, а по пусковым свойствам иногда даже превосходит его. Основным недостатком такого двигателя является сравнительно большая масса и габариты конденсатора.

При легких условиях пуска (небольшой нагрузочный момент в пусковой период) часто применяют двигатели с пусковым сопротивлением. Такие двигатели надежны в работе и выпускаются серийно.

Отметим еще раз, что однофазными рассмотренные двигатели являются только по используемому источнику питания; по конструкции же не существует однофазных двигателей, по этому признаку они являются двухфазными.

На практике часто за неимением однофазных двигателей для работы от однофазной сети используют трехфазные двигатели. В этом случае для образования вращающегося магнитного поля (чаще эллиптического) используются обмотки всех трех фаз, в которых с помощью фазосдвигающих элементов создается обычно несимметричная трехфазная система токов.

На рис. 2.9 представлены наиболее часто применяемые схемы трехфазных двигателей, имеющих три выводных конца обмотки, для работы

от однофазной сети. Наилучшими из этих схем следует считать схемы *в* и *е*. При включении по этим схемам в случае правильного выбора емкости конденсатора двигатель обладает вполне удовлетворительными пусковыми и рабочими свойствами.

Схемы рис 2.9, ж,з применяются в том случае, когда у двигателя имеется шесть выводных концов – начала и концы всех фаз. При правильно рассчитанных фазосдвигающих элементах этот двигатель имеет достаточно хорошие пусковые и рабочие свойства.

На практике часто вследствие сложности расчета фазосдвигаю-

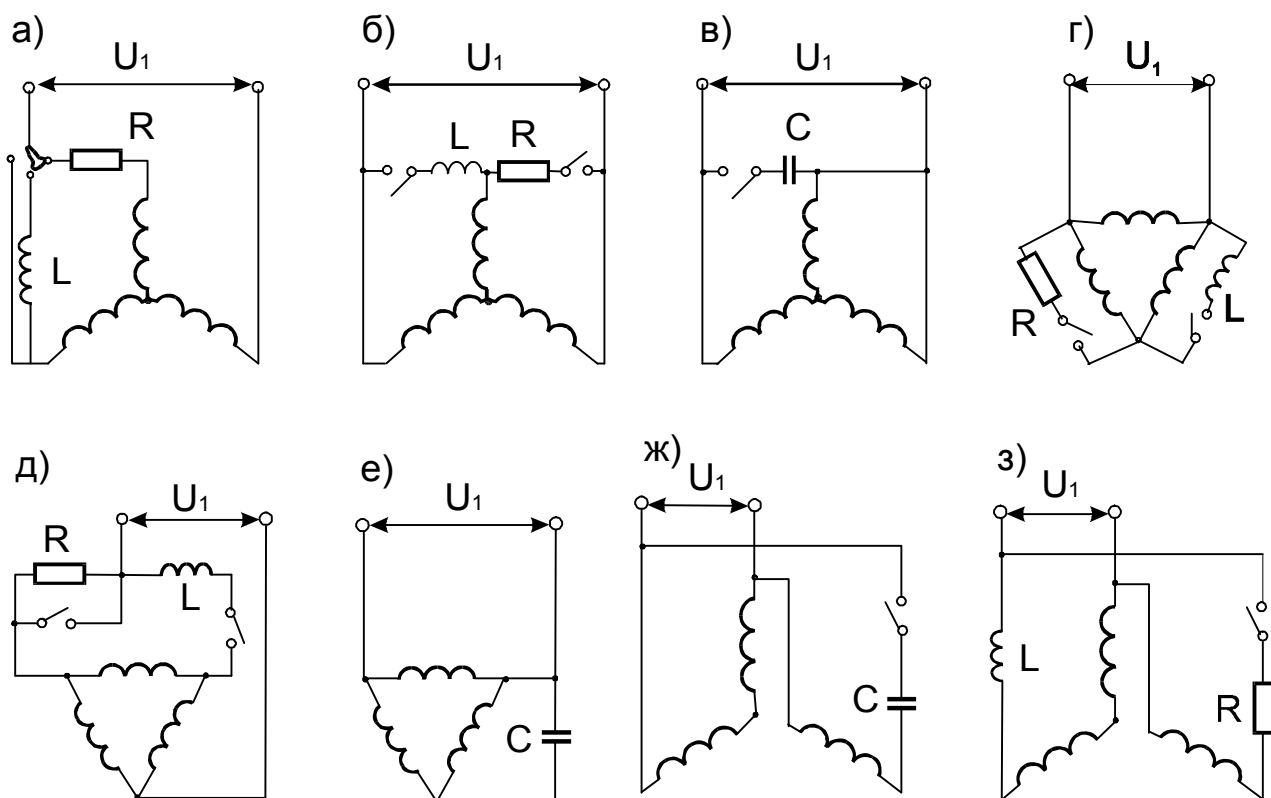


Рис.2.9. Схемы включения трехфазных двигателей для работы от однофазной сети щих элементов их величину определяют путем подбора. Критерием правильности подбора служат значения пусковых и рабочих вращающихся моментов и токов в фазах, а также нагрев двигателя.

Значение емкости подбираемого конденсатора ориентировочно может быть принято равной 7...10 мкф на каждые 100 Вт мощности двигателя.

2.1.3. Синхронные микродвигатели

В системах автоматики широко применяют синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких сотен Ватт. Отличительной особенностью этих двигателей, определяющей области их использования, является постоянство скорости вращения при неизменной частоте f_1

питающей сети. Скорость вращения ротора двигателя в синхронном режиме при моменте сил сопротивления меньшем момента, развиваемого двигателем, не зависит от колебаний напряжения питания и момента сопротивления. Она равна скорости вращения магнитного поля – синхронной скорости вращения $n_c = n_l = 60f/p$, где p – число пар полюсов.

Это свойство синхронных двигателей позволяет использовать их в различных устройствах, где требуется поддерживать с высокой точностью среднюю скорость вращения – в электрических часовых механизмах, лентопротяжных механизмах самопишущих приборов, радиоаппаратуре, программных устройствах, гироскопических системах и пр., а также в системах синхронной связи, где скорость вращения механизмов управляется изменением частоты питающего напряжения.

Вращение с одинаковой скоростью ротора и магнитного поля, созданного статором, в синхронных двигателях достигается за счет специальной конструкции ротора. В зависимости от конструкции ротора силовые синхронные микродвигатели можно разделить на двигатели с постоянными магнитами (активные), реактивные и гистерезисные (рис. 2.10). Микродвигатели с электромагнитным возбуждением (с обмоткой возбуждения постоянного тока на полюсах) в схемах автоматики не нашли применения.

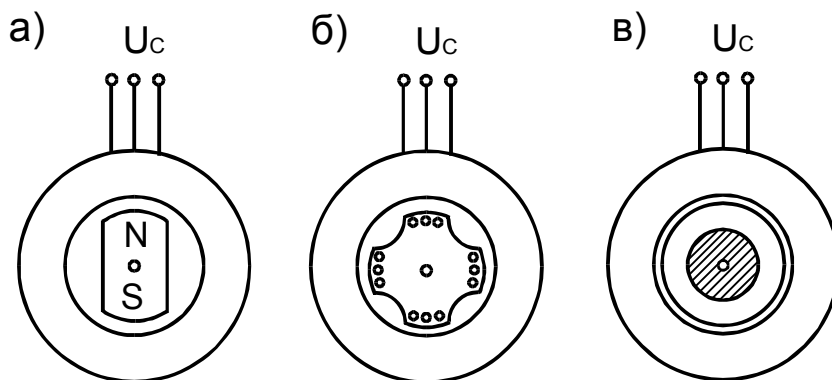


Рис. 2.10. Основные конструктивные схемы синхронных микродвигателей: а - с постоянными магнитами ($p=1$); б - реактивный ($p=2$); в - гистерезисный

двигателя постоянного тока на полюсах) в схемах автоматики не нашли применения.

Статор синхронных двигателей имеет то же самое назначение, что и статор асинхронных двигателей – создавать вращающееся магнитное поле при

подключении к соответствующему источнику переменного тока. Поэтому он имеет и аналогичную конструкцию: в его пазах размещают двухфазную либо трехфазную обмотку, подключаемые к источнику однофазного (с конденсатором в одной из фаз) либо трехфазного напряжения. Соответственно двигатели называются однофазными или трехфазными (по используемому источнику питания, а не по конструкции).

Вращающий момент *активного* (с постоянными магнитами) ротора приближенно равен

$$M = \frac{m_1 E_0 U}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = M_A + M_P, \quad (2.3)$$

где m_1 – число фаз обмотки статора; E_0 – эдс, наводимая магнитным полем ротора в фазе обмотки статора при $n=n_1$ при холостом ходе; U – фазное напряжение; ω_1 – синхронная скорость; x_d – синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по продольной оси машины (оси, совпадающей с осью полюсов); x_q – синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по поперечной оси машины (оси, направленной перпендикулярно оси полюсов); θ – угол между вектором эдс, наводимой потоком по продольной оси, и вектором напряжения.

Вращающий момент M синхронного двигателя с возбужденными явно выраженными полюсами является суммой двух моментов: электромагнитного M_A , возникающего за счет взаимодействия вращающегося поля статора с магнитным полем возбуждения полюсов ротора, и реактивного M_P , обусловленного неравенством магнитных проводимостей машины по продольной и поперечной осям. На рис. 2.11 и 2.12 схематично показана

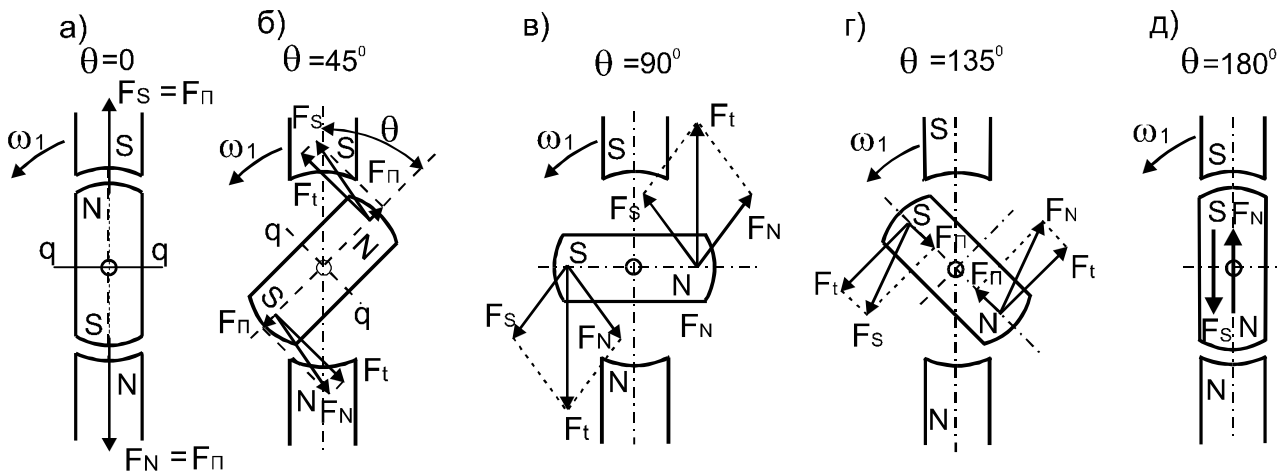


Рис.2.11. Электромагнитные силы, действующие на возбужденный ротор (без учета реактивного момента)

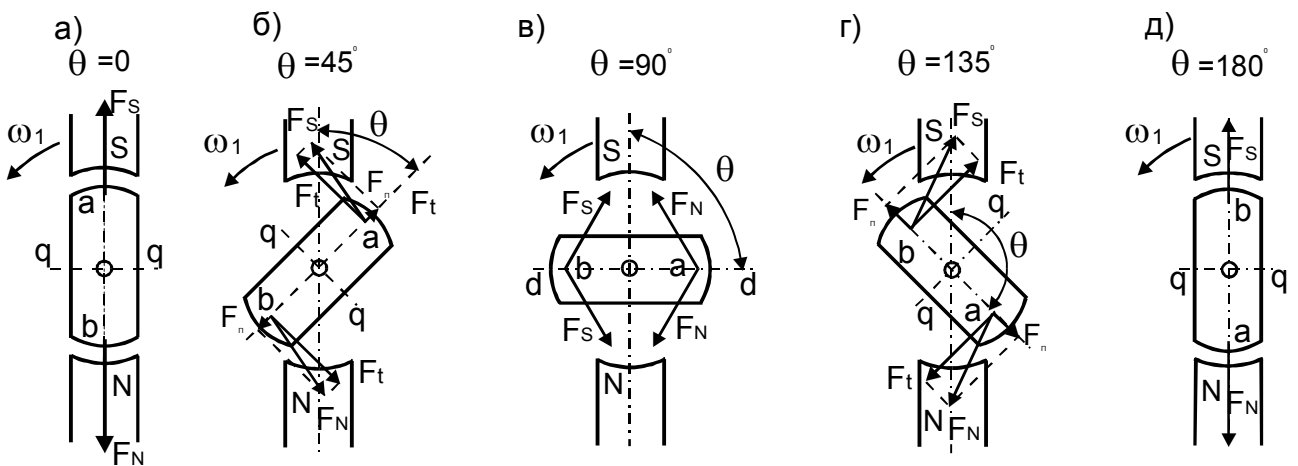


Рис.2.12. Электромагнитные силы, действующие на невозбужденный ротор с явно выраженными полюсами

природа возникновения электромагнитного и реактивного моментов синхронного двигателя. Вращающееся магнитное поле представлено в виде двух полюсов магнита.

У активных двигателей с неявновыраженными полюсами $x_d=x_q$ и поэтому реактивный момент у них равен нулю.

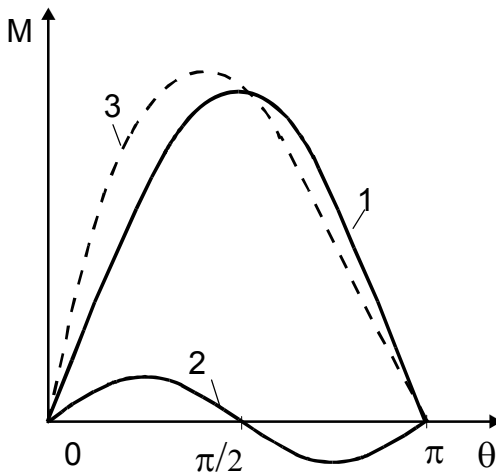


Рис.2.13. Угловые характеристики явнополюсной и неявнополюсной машины

На рис. 2.13 представлены зависимости электромагнитного, реактивного и суммарного моментов от угла θ . При неявнополюсной машине зависимость $M=M(\theta)$ представляет собой синусоиду, симметричную относительно осей координат (кривая 1). При явнополюсной машине в результате стремления ротора ориентироваться по оси результирующего поля из-за неодинаковой магнитной проводимости по его продольной и поперечной осям, возникает реактивный момент (кривая 2), что несколько искажает синусоидальную зависимость $M=M(\theta)$ (кривая 3). Кривые $M=M(\theta)$ называют угловыми характеристиками.

Синхронными реактивными двигателями называют такие двигатели, в которых вращающееся магнитное поле создается только магнитодвижущей силой статора, полюса явнополюсного ротора не возбуждены и вращающий момент создается вследствие упругой деформации магнитных силовых линий при рассогласовании осей ротора и вращающегося магнитного поля статора. Реактивный вращающий момент образуется в результате неравенства магнитной проводимости по продольной и поперечной осям и определяется вторым слагаемым в выражении (2.3). Сам ротор изготавливается из магнитомягкого материала. Чтобы понять сущность реактивного вращающего момента, рассмотрим рис. 2.12.

На рис. 2.12,а показано положение ротора в том случае, когда угол рассогласования между осями статорных полюсов и ротора $\theta=0$. Магнитные силовые линии проходят по пути наименьшего сопротивления и не деформируются. Реактивный вращающий момент $M_p=0$. Ротор занимает положение устойчивого равновесия. Если принудительно повернуть ротор на угол θ по часовой стрелке (рис. 2.12,б), то магнитные силовые линии изогнутся. Деформация магнитного поля вызовет вследствие упругих свойств силовых линий реактивный вращающий момент, стремящийся повернуть ротор против часовой стрелки. Очевидно, ротор установится под таким углом к оси статора, при котором внешний момент уравнивается реактивным моментом двигателя. При повороте ротора на 90° (рис.

2.12,в) силовые линии поля будут вновь проходить прямолинейно, не изгибаясь, но магнитная проводимость в этом случае меньше, чем при $\theta=0$. Реактивный момент $M_P=0$, то есть ротор будет находиться в равновесии. Однако это равновесие неустойчиво.

Величина угла, при котором реактивный вращающий момент достигает максимума, зависит от конфигурации воздушного зазора между статором и ротором.

Нами был рассмотрен физический процесс создания реактивного момента в статическом режиме при смещении оси ротора относительно оси полюсов постоянного магнита. В реальных синхронных реактивных двигателях обмотки статора создают магнитное поле, вращающееся в пространстве, а ротор увлекается реактивным моментом вслед за полем и вращается со скоростью поля.

Важной характеристикой синхронного двигателя является удельный реактивный момент, то есть момент, приходящийся на 1° угла рассогласования при значениях θ , близких к нулю:

$$M_{P\gamma\theta}=(dM_P/d\theta)\theta=0. \quad (2.4)$$

Величина удельного реактивного момента зависит от приложенного напряжения и разности магнитных проводимостей, то есть от формы ротора.

Существенным недостатком активных и реактивных синхронных двигателей является отсутствие в них начального пускового момента. При включении обмотки статора в сеть в двигателе возникает магнитное поле, которое сразу же начинает вращаться с синхронной угловой скоростью в пространстве, а, следовательно, и относительно неподвижного ротора. Ротор же, обладая определенным моментом инерции, не может мгновенно развить синхронной скорости. В результате на ротор действует знакопеременный момент и ротор остается неподвижным. Для того, чтобы ротор мог вращаться синхронно с полем, его необходимо разогнать до угловой скорости, близкой к синхронной. Тогда вследствие малой разности скоростей поля и ротора ротор за счет сил взаимодействия с вращающимся магнитным полем статора может втянуться в синхронизм – начать вращаться синхронно.

Иногда активные и реактивные двигатели пускают в ход путем постепенного повышения частоты питающего напряжения от нуля до номинальной. При частотном пуске двигатель развивает значительные пусковые моменты, ротор двигателя плавно без скачка входит в синхронизм. Однако такой пуск требует специального довольно сложного источника питания.

подавляющее большинство синхронных микродвигателей, применяемых на практике, имеют асинхронный пуск. Для этого в конструкцию ротора вводят дополнительно короткозамкнутую обмотку, выполненную

по типу беличьей клетки. При этом ротор двигателя пускается и разгоняется до околосинхронной скорости за счет асинхронного момента. По достижении скорости, близкой к синхронной ($\approx 0,95 \omega_1$), ротор за счет взаимодействия его полюсов с вращающимся магнитным полем статора скачком втягивается в синхронизм.

Характерной особенностью синхронного двигателя с постоянными магнитами является то, что при пуске кроме асинхронного вращающего момента M_{AC} возникает еще и тормозной момент M_T . В процессе разгона двигателя поле постоянных магнитов пересекает обмотку статора и индуктирует в ней эдс, пропорциональную скорости вращения ротора. Вследствие этого в обмотке статора возникает переменный ток, который, взаимодействуя с магнитным потоком ротора, создает тормозящий момент. То есть физическая причина возникновения тормозного и асинхронного моментов одинакова. Однако характер изменения этих моментов от скольжения ротора будет различным (рис. 2.14), так как эдс, индуктируемая потоком статора в пусковой обмотке ротора в процессе

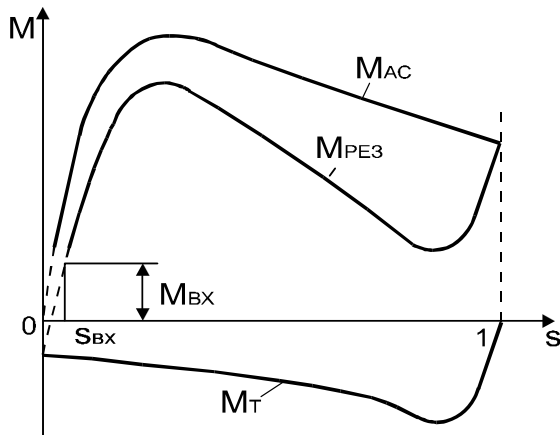


Рис. 2.14. Зависимость $M=M(s)$ для двигателя с постоянными магнитами

его разгона, пропорциональна скольжению s , а эдс, индуктируемая потоком ротора в обмотке статора, пропорциональна n_2 , то есть $(1 - s)$. Поэтому, если максимум асинхронного момента, как и в асинхронном двигателе нормального исполнения, находится в области небольших скольжений, то максимум тормозного момента будет находиться в области небольших значений $(1 - s)$. Следовательно, зависимость результирующего пускового момента $M_{PE3} = M_{AC} + M_T$ от скольжения имеет провал в области малых скоростей вращения. Вход в синхронизм происходит при скольжении s_{BX} , при котором пусковая обмотка развивает достаточно большой момент M_{BX} .

В активных синхронных двигателях вращающий момент складывается из двух моментов — электромагнитного и реактивного. Следовательно, при тех же габаритах синхронный реактивный двигатель развивает меньший вращающий момент, чем активный синхронный двигатель, и имеет более низкий коэффициент полезного действия, не превышающий обычно $0,2 \dots 0,4$ у двигателей мощностью в десятки ватт и $0,05 \dots 0,25$ у двигателей мощностью от долей до единиц ватт.

Большим недостатком реактивных синхронных двигателей является также низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi$), не превышающий обычно $0,5$. Это объясняется тем, что магнитный поток в двигателе создается ис-

ключительно за счет реактивного тока обмотки статора. Поэтому с целью повышения коэффициента мощности рациональнее реактивный синхронный двигатель выполнять двухфазным конденсаторным, а не трехфазным, так как в нем индуктивность в значительной степени компенсируется емкостью конденсатора.

Еще одной особенностью реактивного двигателя является то, что его момент, как в синхронном, так и в асинхронном режимах прямо пропорционален квадрату приложенного напряжения. Это свойство обуславливает высокую чувствительность двигателя к колебаниям напряжения сети.

Основным достоинством реактивных двигателей по сравнению с активными является их меньшая стоимость.

Синхронным *гистерезисным* двигателем называют двигатель, вращающий момент которого возникает за счет явления гистерезиса при перемагничивании материала ротора. Статор такого двигателя ничем не отличается от статоров других машин переменного тока. От активного синхронного гистерезисный двигатель отличается тем, что его ротор представляет собой массивный цилиндр из магнитотвердого материала с широкой петлей гистерезиса (викаллой, альни). Зазор по всей окружности между статором и ротором равномерный, так как ротор не имеет полюсов и пазов. Обычно в целях экономии не весь ротор изготавливают из магнитотвердого материала, а только активную часть, представляющую собой втулку (полый цилиндр).

Чтобы выяснить природу возникновения гистерезисного момента в двигателе, рассмотрим магнитный ротор, помещенный в поле магнита (рис.2.15).

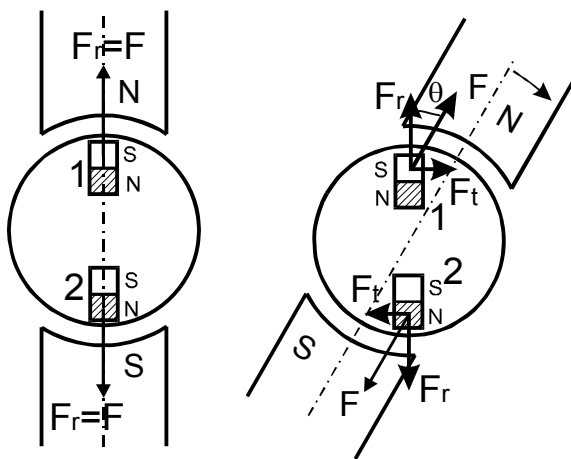


Рис.2.15. К пояснению принципа действия гистерезисного двигателя

Ротор можно представить себе состоящим из элементарных магнетиков. Между ними и полюсами магнита возникают силы взаимодействия, которые на рис. 2.15,а направлены радиально и вращающего момента не создают.

Если вращать магнит NS , то элементарные магнетики будут поворачиваться в том же направлении вслед за полем полюсов. Однако вследствие гистерезисного запаздывания (молекулярного трения) магнетики 1 и 2 будут несколько отставать

от поля полюсов и между ними появится угол рассогласования θ (рис. 2.15,б). В этом случае, кроме радиальных сил взаимодействия F_r , возникнут тангенциальные силы взаимодействия F_t , которые и создают гистере-

зисный вращающий момент. Очевидно, аналогичная картина будет и в том случае, когда вместо магнита NS в машине имеется вращающееся магнитное поле, создаваемое системой токов в обмотке неподвижного статора.

При увеличении угла θ тангенциальные силы возрастают. Угол θ определяется только формой петли гистерезиса, то есть той коэрцитивной силой, при которой начинает изменяться направление поля элементарных магнетиков, и не зависит от скорости вращения ротора. Соответственно не зависит от скорости вращения ротора и величина вращающего гистерезисного момента, то есть такой двигатель имеет пусковой момент.

При пуске двигателя, когда скорость вращения ротора не равна скорости вращения поля, кроме гистерезисного момента M_G появляется также асинхронный момент M_{AC} (момент от вихревых токов в роторе). Так как ротор имеет большое активное сопротивление, то зависимость $M_{AC}=f(s)$ близка к линейной.

Механическая характеристика гистерезисного двигателя показана на

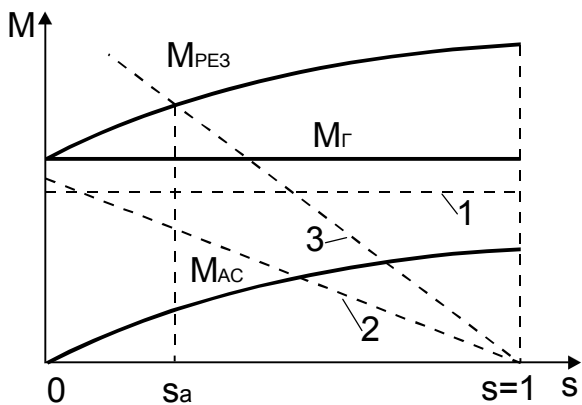


Рис. 2.16. Механическая характеристика гистерезисного двигателя

рис. 2.16. Наибольшего значения результирующий вращающий момент M_{PE3} достигает в момент пуска. Этот двигатель развивает вращающий момент и при асинхронной, и при синхронной скорости вращения ротора. Режим его работы зависит от величины и характера момента нагрузки на валу ротора. Если во всем диапазоне скольжений от 1 до 0 момент нагрузки меньше гистерезисного момента (линии 1 и 2 на рис. 2.16), то двигатель работает в синхронном режиме. В этом

случае отсутствует перемагничивание ротора и рабочим моментом является синхронизирующий момент, характерный для любого синхронного двигателя. Магнитное поле ротора сохраняется вследствие большого остаточного магнетизма. Если же момент нагрузки превосходит гистерезисный момент (линия 3 на рис. 2.16), то скорость вращения будет устойчивой при скольжении s_a , и двигатель будет работать в асинхронном режиме. Однако использование гистерезисных двигателей в асинхронном режиме неэкономично вследствие больших потерь на перемагничивание, особенно при больших скольжениях.

Величина гистерезисного момента определяется формой петли гистерезиса материала ротора. Идеальной была бы петля прямоугольной формы. Материалы типа викаллоу и альни весьма близки к этому идеалу. Обычные электротехнические стали (магнитомягкие материалы) имеют

узкую петлю гистерезиса и не обеспечивают сколь-нибудь значительного гистерезисного момента.

К положительным качествам синхронных гистерезисных двигателей относятся:

- простота конструкции, обуславливающая их надежность в эксплуатации;

- большой пусковой момент и момент входа в синхронизм, а также плавность входа в синхронизм (отсутствие рывка) благодаря постоянной величине гистерезисного момента;

- потребляемый гистерезисным двигателем ток изменяется незначительно (на 20...30%) при изменении режима работы от короткого замыкания (пуск) до рабочего режима. Это позволяет эффективно использовать гистерезисные двигатели в повторно-кратковременном режиме, обеспечивает возможность работы двигателя от маломощных источников питания, а также обеспечивает хорошие пусковые и рабочие характеристики в однофазном режиме с постоянно включенными конденсаторами;

- бесшумность в работе;

- возможность использования одного и того же ротора для статоров с различным числом полюсов, так как ротор не имеет конструктивных полюсов.

Одним из недостатков гистерезисного двигателя является сравнительно невысокие коэффициент полезного действия (до 0,5) и коэффициент мощности (до 0,45). Причиной этого является малая магнитная проницаемость и малая намагниченность активной части ротора. Они могут быть повышены путем подмагничивания ротора посредством кратковременного (на несколько периодов тока) повышения величины магнитного потока статора за счет увеличения подводимого к статору напряжения. Подмагниченный ротор, как и ротор с постоянными магнитами активного синхронного двигателя, начинает больше участвовать в создании основного рабочего магнитного потока и тем самым разгружать обмотку статора от реактивного намагничивающего тока.

Одной из разновидностей гистерезисного двигателя является двигатель с экранированными полюсами. Он имеет явнополюсный статор с однофазной катушечной обмоткой. На полюсах статора расположены экранирующие короткозамкнутые витки, охватывающие половину каждого полюса. Экранирующие витки создают сдвиг по фазе между магнитными потоками, проходящими через экранированную и неэкранированную части полюсов, в результате чего в двигателе создается вращающееся магнитное поле.

Ротор двигателя состоит из нескольких дисков, выполненных из магнитотвердого материала. Кольцевой обод в дисках позволяет получить асинхронный и гистерезисный моменты.

Существенным недостатком синхронных двигателей является склонность к колебаниям (качаниям) их роторов. Средняя угловая скорость роторов синхронных микродвигателей при постоянной частоте напряжения питания – величина постоянная и равная (или кратная) средней угловой скорости магнитного поля. При этом мгновенная угловая скорость ротора может колебаться в пределах одного оборота относительно средней скорости. Обычно качания ротора начинаются при резких изменениях момента сопротивления на валу двигателя или скорости вращения поля. Уже говорилось, что при работе двигателя с некоторой постоянной нагрузкой ось полюсов его ротора смещена относительно оси поля статора на некоторый угол θ . Если предположить, что нагрузка на двигатель уменьшилась, то этот угол уменьшится и станет равным θ_1 электрических градусов. Однако этот новый угол установится не сразу. Вследствие момента инерции ротор пройдет положение θ_1 и угол станет равным $\theta_2 < \theta_1$. При этом момент, развиваемый двигателем, будет меньше тормозного момента и угол начнет увеличиваться (ротор несколько отстанет и произойдет натяжение магнитных силовых линий), приближаясь к положению θ_1 , но опять под действием сил инерции ротор пройдет положение θ_1 и угол станет равным $\theta_2' > \theta_1$. Таким образом, будут происходить колебания ротора относительно положения θ_1 . Продолжительность колебаний ротора и их амплитуда зависят от величины внешних возмущений и от соотношения частоты возмущений и собственной частоты колебаний ротора. Эти колебания сопровождаются периодическим увеличением и уменьшением скорости вращения, что вызывает неравномерность хода ротора и может приводить к погрешностям в схемах. Особенно это нежелательно при использовании двигателей в системах синхронной связи или преобразования угловых перемещений.

Короткозамкнутая пусковая обмотка, расположенная на роторе двигателей активного и реактивного типов, в синхронном режиме является электрическим демпфером. При изменении мгновенной угловой скорости ротора в этой обмотке наводятся токи, создающие во взаимодействии с вызвавшим их магнитным полем демпфирующий асинхронный момент. Правильный выбор параметров короткозамкнутой обмотки может обеспечить существенное уменьшение амплитуды колебаний мгновенной угловой скорости ротора. Нестабильность мгновенной угловой скорости роторов синхронных реактивных двигателей даже при наличии короткозамкнутой обмотки может быть достаточно велика. Это объясняется сильным действием моментов высших пространственных гармоник магнитного поля и зубчатых реактивных моментов вследствие особенностей конструкции ротора.

Момент инерции нагрузки следует выбирать так, чтобы сдвинуть собственную частоту двигателя от частоты переменных сил, которые могут вызвать резонансные явления в двигателе.

Для материалов, применяемых в гистерезисных двигателях, максимальное значение угла θ составляет $30...50^\circ$. Так как максимальный синхронный момент у гистерезисного двигателя при тех же габаритах больше, чем у активных и реактивных двигателей, то при одном и том же моменте на валу гистерезисный двигатель работает с меньшим внутренним углом и поэтому имеет меньшие колебания (качания) ротора, вызванные изменением нагрузки или напряжения питания. Сказанное справедливо, если активный и реактивный синхронные двигатели не имеют короткозамкнутых обмоток на статоре.

Для количественной оценки равномерности вращения ротора вводят понятие нестабильности мгновенной угловой скорости ротора, которая равна отношению максимального перепада скорости к ее среднему значению:

$$N = (\omega_{2\max} - \omega_{2\min}) / \omega_{2\text{ср}}$$

В таблице 2.1 приведены ориентировочные показатели нестабильности угловой скорости ротора различных синхронных микродвигателей в диапазоне мощностей от единиц до нескольких десятков ватт.

Таблица 2.1.

Тип синхронного микродвигателя	Нестабильность, $N \cdot 10^{-3}$	Амплитуда колебаний, угл.мин.
С постоянными магнитами и короткозамкнутой обмоткой	0,2...0,8	3,5...30
Гистерезисные	1,8...1,6	6...23
Реактивные с короткозамкнутой обмоткой	6...12	8...18

2.2. Силовые микродвигатели постоянного тока

Как уже отмечалось ранее, все силовые микродвигатели подключаются к одному источнику питания. Это требование определяет способы включения обмоток силового двигателя постоянного тока, что, в свою очередь, определяет характеристики двигателя.

Обмотки двигателя постоянного тока с электромагнитным возбуждением (возбуждения и якорная) могут быть подключены к источнику питания двумя способами – параллельно либо последовательно друг другу (рис. 2.17, рис. 2.18). Соответственно включенные таким образом двигате-

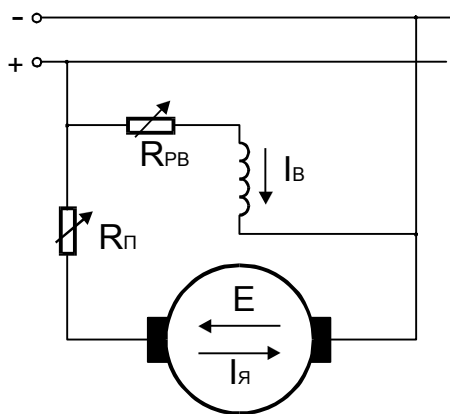


Рис.2.17. Схема двигателя с параллельным возбуждением

ную), поэтому могут быть

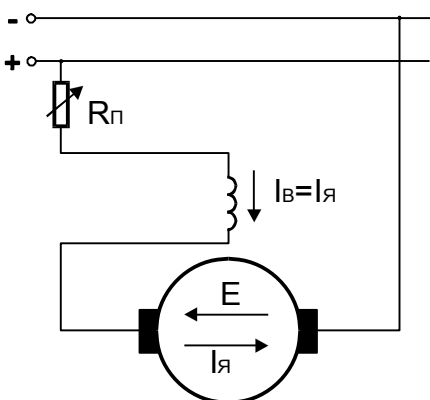


Рис.2.18. Схема двигателя с последовательным возбуждением

эфициент полезного действия, большие пусковые моменты, существенно меньшие по сравнению с двигателями постоянного тока той же мощности габариты и масса, возможность получения самых различных скоростей вращения, простота изменения скорости вращения в случае необходимости.

Основным недостатком двигателей постоянного тока, существенно ограничивающих области их использования, является наличие в них механического щеточно-коллекторного узла, снижающего надежность работы и вызывающего появление радиопомех. Разработанные и изготавливаемые в настоящее время двигатели с электронным коммутатором вместо механического лишены этого недостатка при сохранении основных перечисленных положительных свойств, однако существенно дороже и имеют большие габариты (за счет коммутатора).

Существующие коллекторные двигатели переменного тока и универсальные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе, в схемах автоматики не используются.

ли называются двигателями постоянного тока с параллельным возбуждением и двигателями с последовательным возбуждением. Некоторые двигатели имеют две обмотки возбуждения, одна из которых может быть включена параллельно, а другая – последовательно с якорной обмоткой (смешанное возбуждение). Однако такие двигатели не нашли применения в приборных схемах автоматики, поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением имеют одну обмотку (якорную), поэтому могут быть подключены к источнику питания единственным образом. Это справедливо при использовании этих двигателей как в качестве силовых, так и исполнительных. Поскольку характеристики двигателей в данном случае не зависят от назначения, они подробно будут рассмотрены в следующей главе.

Двигатели постоянного тока широко применяются для привода самых различных механизмов, особенно в приводах автономных систем, которые находят широкое применение на различных подвижных объектах.

К положительным качествам двигателей постоянного тока относят: высокий ко-

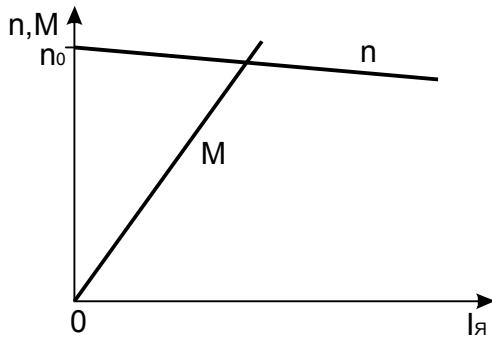


Рис. 2.19. Моментная и скоростная характеристики двигателя с параллельным возбуждением

будут линейными (рис. 2.19). Следовательно, линейной будет и механическая характеристика двигателя $n=f(M)$ (рис. 2.20).

Если в цепь якоря включить добавочное сопротивление R_D , то

$$n = [U - I_{\text{я}} (\sum R_{\text{я}} + R_D)] / (C_E \Phi) = n_0 - \Delta n,$$

где n_0 — скорость вращения при холостом ходе; Δn — снижение скорости, обусловленное суммарным падением во всех сопротивлениях, включенных в цепь якоря.

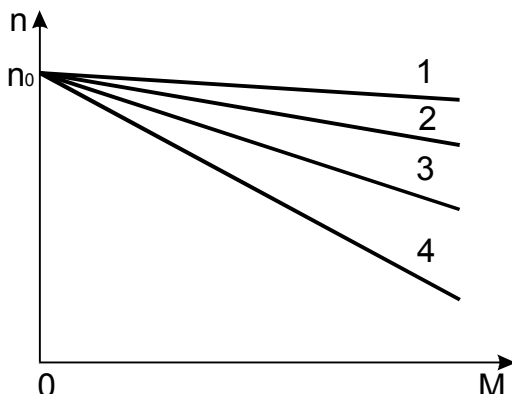


Рис. 2.20. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением

Характерной особенностью двигателя с параллельным возбуждением является то, что его ток возбуждения не зависит от тока якоря (тока нагрузки), то есть они по существу являются двигателями с независимым возбуждением. При этом условии согласно выражениям (1.34, 1.39) получим, что зависимости момента двигателя и скорости вращения от тока якоря (моментная и скоростная характе-

Величина Δn определяет наклон скоростной $n=f(I_{\text{я}})$ и механической $n=f(M)$ характеристик к оси абсцисс. При отсутствии в цепи якоря добавочного сопротивления указанные характеристики будут "жесткими" (естественная характеристика 1 на рис. 2.20), так как падение напряжения в обмотках машины при номинальной нагрузке составляет лишь 3...5% от номинального напряжения. При изменении нагрузки от холостого

хода до номинальной скорость вращения уменьшается на 3...8%. При включении добавочного сопротивления угол наклона этих характеристик возрастает, вследствие чего образуется семейство реостатных характеристик 2, 3, 4 на рис. 2.20, соответствующих различным сопротивлениям. Чем больше добавочное сопротивление, тем больший угол наклона имеет реостатная характеристика, то есть тем она "мягче". Последнее обстоятельство необходимо учитывать при изменении сопротивления обмотки якоря при нагреве в процессе эксплуатации.

Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением представляют собой зависимости потребляемой мощности P_1 , тока $I_{\text{я}} \approx I_N$,

скорости вращения n , момента M и коэффициента полезного действия η от отдаваемой мощности P_2 на валу двигателя при $U=\text{const}$ и $I_B=\text{const}$. Характеристики $n=f(P_2)$ и $M=f(P_2)$ являются линейными, а зависимости $P_1=f(P_2)$, $I=f(P_2)$ и $\eta=f(P_2)$ имеют характер, общий для всех двигателей (см. рис. 2.3).

В двигателе с последовательным возбуждением ток возбуждения равен току якоря, поэтому магнитный поток является некоторой функцией тока якоря. Характер этой функции изменяется в зависимости от нагрузки двигателя. При небольших нагрузках в пределах ненасыщенного состояния стали поток пропорционален току якоря и, следовательно, момент пропорционален квадрату тока якоря. При значительных нагрузках, то есть при сильном насыщении стали, $\Phi=\text{const}$, и так же, как и в двигателе с параллельным возбуждением момент пропорционален току якоря. При холостом ходе и малых нагрузках на валу ток двигателя и магнитный поток имеют небольшие значения. Следовательно, скорость вращения значительно возрастает, и двигатель может пойти в разнос, то есть может нарушиться механическая прочность вращающихся частей машины. Поэтому нельзя допускать работу двигателя с последовательным возбуждением при холостом ходе и при малых нагрузках. Только двигатели малой мощности (до нескольких десятков ватт) используют для работы в устройствах, где возможен холостой ход. Это объясняется тем, что в этих двигателях собственные моменты трения сопоставимы с моментами нагрузки.

Скоростная и механическая характеристики этих двигателей являются "мягкими" и имеют гиперболический, то есть резко падающий характер.

Двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением не нашли широкого применения в схемах автоматики. Их целесообразно использовать только в тех случаях, когда имеют место изменение нагрузочного момента в широких пределах и тяжелые условия пуска. Последнее объясняется тем, что в этом случае потребляемая двигателем мощность изменяется в меньших пределах, чем у двигателей с параллельным возбуждением.

Для микродвигателей постоянного тока всегда применяют прямой пуск, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети.

Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление тока в обмотке якоря или в обмотке возбуждения. Одновременное изменение направления тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения не изменяют направления вращения двигателя.

К некоторым двигателям постоянного тока предъявляется требование постоянства скорости вращения при изменении нагрузки и изменении в небольших пределах напряжения питания. В этом случае стабилизация скорости вращения осуществляется при помощи центробежных (механи-

ческих) либо электронных регуляторов.

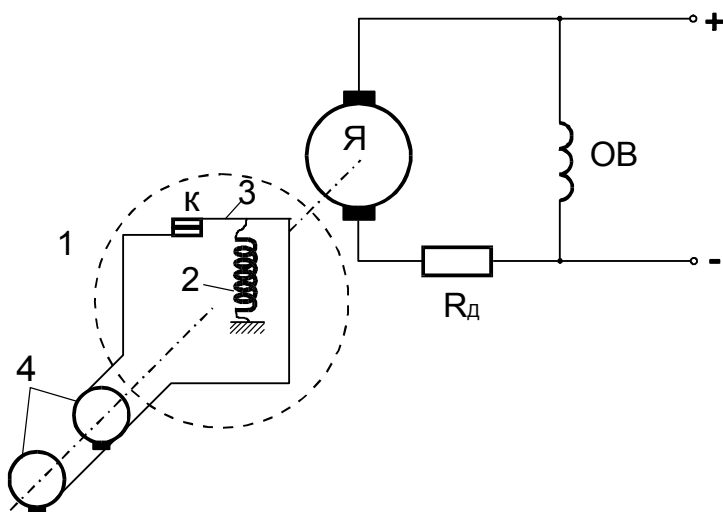


Рис. 2.21. Схема устройства центробежно-вибрационного регулятора скорости

Центробежный регулятор скорости (рис. 2.21) состоит из диска 1 и контактов K . Диск, закрепленный на валу двигателя, вращается вместе с валом. Один из контактов закреплен на диске неподвижно, а другой контакт закреплен на контактной пластине 3, которая прижимается пружиной 2. В нормальном состоянии контакты замкнуты и шунтируют добавочное сопротивление R_d , включенное в цепь обмотки якоря. Контакты соединяются с добавочным сопротивлением

через контактные кольца 4, вращающиеся вместе с валом. При превышении номинальной скорости пластина 3 под действием центробежных сил преодолевает сопротивление пружины, изгибается и размыкает контакты K , что приводит к включению в цепь якорной обмотки добавочного сопротивления. Это вызывает понижение скорости вращения двигателя, замыкание контактов и вследствие этого повышение скорости вращения и т.д. Процесс размыкания и замыкания контактов периодически повторяется, а скорость вращения электродвигателя, несколько пульсируя, сохраняет постоянное среднее значение.

Центробежные регуляторы рассмотренной схемы рассчитываются на работу с двигателями, ток в якоре которых не превышает 2...3 А. При большей мощности двигателя контакты регулятора выполняются нормально разомкнутыми и при увеличении скорости вращения они шунтируют добавочное сопротивление, включенное в цепь обмотки возбуждения.

Погрешность стабилизации скорости при использовании центробежных регуляторов составляет единицы процентов. Использование электронных схем стабилизации позволяет достичь стабильности скорости вращения в доли процента. Их применение требует наличия в конструкции двигателя датчика, выдающего информацию о текущей скорости вращения в виде электрического сигнала.

2.3. Гироскопические двигатели (гиромоторы)

В большинстве классических гироскопических приборов ротор гироскопа приводится во вращение электродвигателем. Совокупность ротора,

электропривода, роторных опор, называемых главными опорами гироскопа, и элементов, крепящих двигатель на раме гироскопа, представляет собой гиромотор (гиродвигатель).

Гиромотор является очень специфическим двигателем. По назначению его можно отнести к силовым (неуправляемым) машинам, хотя в процессе работы он не совершает никаких полезных перемещений нагрузки, а только вращает с постоянной скоростью некоторую массу, то есть с точки зрения обычного двигателя работает в режиме холостого хода.

Особенности конструкции, устройства и свойства гиромоторов определяются требованиями, которые предъявляются к гироскопам, основными из которых являются: большой кинетический момент, постоянство кинетического момента, малое время разгона до номинальной скорости, большой ресурс работы.

В настоящее время, за исключением редких специальных случаев, используются гиромоторы переменного тока – асинхронные и синхронные с трехфазной статорной обмоткой.

Кинетический момент равен произведению момента инерции ротора J на угловую скорость его вращения ω_2 :

$$H = J\omega_2. \quad (2.5)$$

В свою очередь, момент инерции вращающегося цилиндра равен $J = mr^2/2$, где m , r – масса и радиус цилиндра соответственно.

Для получения максимально возможного момента инерции ротора в заданных габаритах гиромоторы выполняются по обращенной схеме. В отличие от обычного двигателя статор гиромотора размещается внутри охватывающего его ротора. Такая компоновка позволяет значительно увеличить размеры вращающегося ротора и получить в заданных габаритах максимально возможный момент инерции.

Массу ротора гиромотора также стремятся сделать максимально возможной. Это достигается путем напрессовки на собственно ротор массивного обода из прочного материала с достаточно большой плотностью (стали или латуни).

Скорость вращения ротора ω_2 стремятся сделать также достаточно высокой. Для этого используют повышенные частоты питания (400 Гц и более), а также применяют статорные обмотки с малым числом пар полюсов (обычно одна пара). Увеличение скорости вращения ограничивается пределом механической прочности, допускаемым материалом ротора, а также резким сокращением срока службы подшипников.

Основным режимом работы гиродвигателя является вращение ротора с максимальной скоростью, который для обычных электродвигателей является режимом холостого хода. При этом с вала гиродвигателя не снимается полезная мощность. Однако для гиродвигате-

лей этот режим считается номинальным, так как нагрузка на двигатель близка к предельной именно при установившемся режиме работы. Это объясняется обстоятельствами, обусловленными обращенной конструкцией двигателя и стремлением отдать максимальный объем машины вращающимся частям, создающим кинетический момент. Поэтому вследствие больших габаритов и массы ротора тормозной момент сил трения о воздушную среду и в подшипниках значительно больше, чем в обычных электродвигателях; мощность двигателя вследствие меньшей площади, занимаемой обмоткой статора, и худших условий охлаждения значительно ниже.

Важным режимом работы для гиродвигателя является пусковой. В процессе разгона момент, развиваемый гиродвигателем, идет на преодоление большого динамического момента $M_D = d\omega_2/dt$, а также моментов трения в подшипниках и о воздух или иную окружающую среду. Вследствие большого момента инерции ротора и относительно малого электромагнитного момента пуск электрического гиродвигателя без принятия специальных мер может быть продолжительным по времени, иногда до 20...30 минут.

При достижении ротором установившейся скорости вращения динамический момент становится равным нулю и момент, развиваемый гиродвигателем, уравнивается моментами трения. По его значению можно определить полезную мощность гиродвигателя

$$P_2 = M\omega_2. \quad (2.6)$$

Мощность, потребляемая гиромотором, целиком идет на покрытие потерь в нем, то есть выделяется в виде тепла в магнитной цепи, обмотках, подшипниках и т.д.

В связи с бурным развитием в 50-х годах ракетно-космической и авиационной техники резко возросли требования, предъявляемые к гироскопическим приборам в отношении основных эксплуатационных характеристик: точности, срока службы, времени готовности. На первый план выдвинулась задача стабилизации центра тяжести гиромотора, решение которой связывалось с совершенствованием конструкции и технологии гиромоторов, с оптимизацией их жесткостных и тепловых характеристик.

Для уменьшения времени разгона, что часто эквивалентно сокращению времени готовности всего прибора, в некоторых схемах на время пуска увеличивают амплитуду подводимого к двигателю напряжения, применяют специальные источники питания, позволяющие плавно повышать частоту и амплитуду питающего напряжения, применяют энергию сжатого газа, пороха, спиральной пружины. Все методы форсированного

запуска гиromоторов в той или иной степени решают поставленную задачу, однако, требуют либо существенного усложнения конструкции двигателя, либо усложнения соответствующей аппаратуры.

При проектировании гиродвигателей стремятся всемерно уменьшить моменты трения. С этой целью подбираются специальные шарикоподшипники самого высокого класса точности; для уменьшения аэродинамического сопротивления среды роторы гиродвигателей делают обтекаемыми, полируя их поверхность и скашивая грани. С этой же целью иногда гиromоторы помещают в герметичные кожухи, внутри которых создается вакуум либо разреженная газовая среда.

В вакуумных гиromоторах остаточное давление внутри гирокамеры составляет 1...5 мм рт. ст., то есть газовая среда практически отсутствует. Это позволяет снизить мощность, потребляемую гиromотором, так как практически исключается момент аэродинамического сопротивления, а также уменьшить время разгона ротора. Однако вакуумирование имеет и отрицательные стороны: 1) плохой теплоотвод от внутренних деталей и узлов гиromотора, так как отсутствует наиболее эффективный способ отвода тепла—конвекция, что влечет за собой неравномерный прогрев конструкции; 2) ухудшение условий работы подшипников, так как обычные смазки в условиях вакуума испаряются, а устойчивые к вакууму смазки обладают пониженными характеристиками.

Гирокамеры газонаполненных гиromоторов заполняются газовой смесью (обычно водородом с примесью гелия), имеющей оптимальные давление, газодинамические и тепловые характеристики. При этом мощность, потребляемая гиromотором, несколько повышается, но зато практически исключаются недостатки, характерные для вакуумных гиromоторов. Современные прецизионные гиromоторы выполняются газонаполненными.

Слабым звеном в традиционных конструкциях гиromоторов является шариковый подшипник. Его износ, неравномерное испарение и перетекание смазки, осевые смещения сепаратора вызывают смещение центра тяжести гиromотора и, следовательно, дрейф гиросприбора; неидеальность изготовления и монтажа подшипника обуславливают вибрацию гиromотора; долговечность подшипника определяет срок службы гиromотора и гиросприбора в целом.

В конце 50-х годов были предложены в качестве опор гиromотора газодинамические опоры. Они просты по конструкции (шпы в подшипнике, разделенные тонким газовым слоем 1...3 мкм), исключают недостатки шарикоподшипниковых опор, не уступая им по жесткости и грузоподъемности, и, что особенно важно, резко увеличивают срок службы гиросприбора.

Однако эти опоры имеют и ряд отрицательных сторон: исключительно сложную технологию их изготовления (поверхности из сверх-

твердого материала – керамики – должны быть обработаны с точностью до долей мкм); ограниченный диапазон скоростей вращения ротора – выше предельных скоростей (обычно свыше 30000 об/мин) газодинамический подшипник становится неустойчивым; повышенное потребление мощности, так как велики потери мощности в газодинамических опорах. Эти недостатки гиросмоторов с газодинамическими опорами существенно сдерживают их применение.

В настоящее время создано достаточно много типов гиросмоторов переменного тока, отличающихся конструктивными особенностями, величиной и стабильностью кинетического момента и др.

На рис. 2.22 изображена конструктивная схема одного из типов асинхронного гиросмотора. Его особенностью является наличие невращающейся оси и составного ротора. В крупном гиросмоторе состоит из узла статора, узла ротора и шарикоподшипниковых узлов.

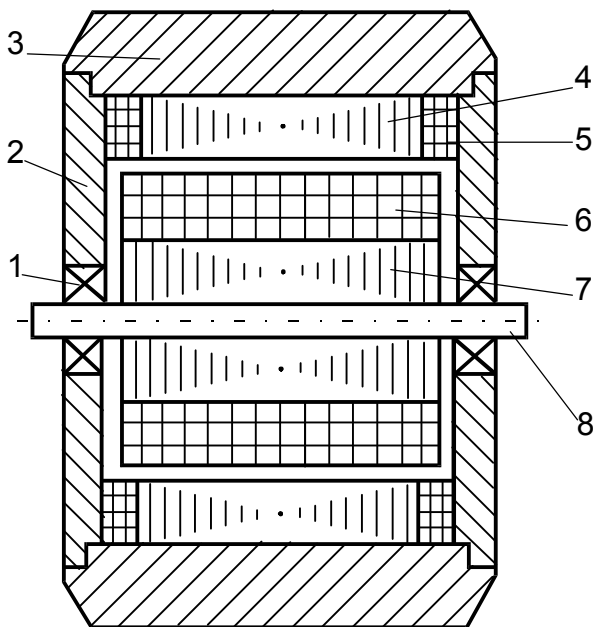


Рис.2.22. Схема асинхронного ГМ

В пазы сердечника заливается алюминиевый сплав, образуя беличью клетку 5.

На ротор напрессован цилиндрический латунный или стальной обод 3 с коническими поверхностями у торцов. Обод имеет полированную внешнюю поверхность и внутренние расточки под беличье колесо, фланец и крышку. Сумма масс перечисленных элементов составляет массу вращающихся частей, что обеспечивает большое значение момента инерции ротора гироскопа относительно главной оси вращения.

С одной стороны ротор прикрывается стальным фланцем, а с другой стороны – стальной крышкой. Цапфы фланца и крышки установлены в

Пакет статора 7 набирается из штампованных тонких пластин электротехнической стали. Каждая пластина перед сборкой в пакет смазывается клеем. Пакет статора собирается на латунной втулке, конец которой развальцовывается. Пакет со втулкой напрессовывается на стальную ось 8.

В пазах сердечника статора укладывается трехфазная обмотка 6, соединенная звездой. Выводные концы обмотки проходят через отверстие в оси.

Пакет ротора 4 набран из тонких штампованных пластин электротехнической стали, склеенных клеем.

подшипники 1.

Большинство деталей гиromоторов изготавливается с допусками самых высоких классов точности и высокой чистотой поверхности. Ротор гиromотора подвергается тщательной динамической балансировке на специальном оборудовании. Балансировка производится высверливанием отверстий на конической поверхности обода 4.

Однороторные гиromоторы в большинстве конструкций обладают существенным недостатком – раскрытием ротора при высоких скоростях вращения под действием центробежных сил, что приводит к смещению центра тяжести всей конструкции, то есть разбалансу гиromотора. Смещение центра тяжести характеризуется расстоянием между точками O и O' (см. рис. 2.23).

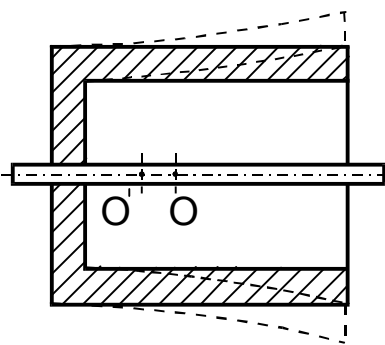


Рис. 2.23. Смещение центра тяжести в однороторном гиromоторе

Рассмотрим пример, иллюстрирующий погрешность трехстепенного гиromотора от смещения центра тяжести. Пусть кинетический момент гиromотора $H=4,9$ Нмс, вес $G=19,6$ Н, смещение центра тяжести $\Delta l=10^{-6}$ м, объект, на котором установлен прибор, движется с ускорением a . Тогда скорость ухода $\omega_y=(19,6 \cdot 10^{-6}/4,9) \cdot a=0,86 \cdot a$ град/час.

Таким образом, смещение центра тяжести гироскопа даже на 1 микрон приводит к существенным погрешностям прибора, особенно при ускоренном движении объекта.

Для устранения вредного влияния раскрытия ротора при его вращении применяются двухстаторные гиromоторы. Их особенностью и характерным признаком является наличие

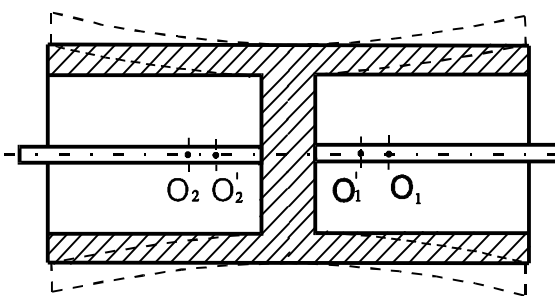


Рис. 2.24. Смещение центров тяжести в двухроторном гиromоторе

двух гиromоторов, вращающих общий симметричный маховик. При вращении обе половинки ротора раскрываются, но смещения (см. рис. 2.24) происходят в противоположных направлениях, поэтому положение центра тяжести всего гиromотора не изменяется. Недостатки таких гиromоторов связаны с наличием двух гиromоторов. Двигатель, разделенный на две половины, требует для своего размещения большего объема, потребляет большую мощность, чем единый двигатель, развивающий такой же вращающий момент.

Асинхронные гиromоторы обладают достаточно хорошими энергетическими показателями. На рис. 2.25 представлены графики достижимых коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и времени

Асинхронные гиromоторы обладают достаточно хорошими энергетическими показателями. На рис. 2.25 представлены графики достижимых коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и времени

разгона от кинетического момента таких гиromоторов. Графики построены для гиromоторов, имеющих одну пару полюсов и частоту питания 400 Гц.

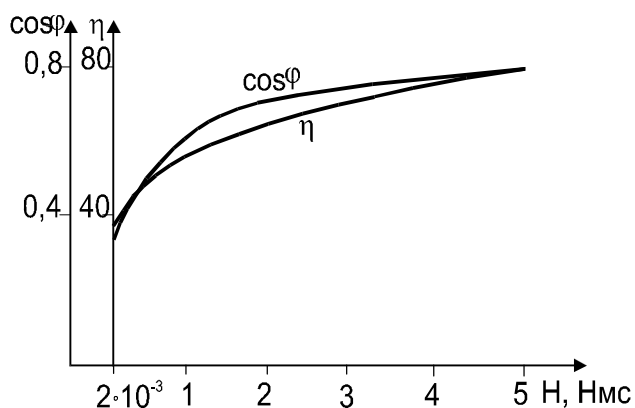


Рис. 2.25. Зависимости КПД и коэффициента мощности от кинетического момента для асинхронных ГМ

С развитием прецизионных систем управления и систем инерциальной навигации встала проблема стабилизации величины кинетического момента с точностью порядка $10^{-2} \dots 10^{-3} \%$, поскольку большее изменение кинетического момента гиromотора вызывает недопустимо большую ошибку в показаниях гиросприбора. Постоянства кинетического момента можно добиться только при неизменном числе оборотов ротора гироскопа,

то есть при постоянной угловой скорости вращения гиromотора. Гиromоторы с асинхронным двигателем, даже в герметичном исполнении, обеспечивают стабильность скорости вращения ротора, а, следовательно, и кинетического момента, с точностью порядка $0,5 \dots 1 \%$. Это обстоятельство объясняется существенной зависимостью скорости вращения ротора асинхронного двигателя от амплитуды напряжения питания, которая в процессе работы оборудования обычно колеблется в некоторых пределах, а также неабсолютной жесткостью механической характеристики такого двигателя, что приводит при изменении момента нагрузки (например, при изменении условий эксплуатации) к изменению скорости вращения ротора.

Следует отметить, что стабилизация скорости вращения асинхронного гиromотора может быть осуществлена с достаточно высокой точностью путем ее контроля с помощью встроенных датчиков скорости и управлением от них характеристиками источника питания (частоты и амплитуды напряжения), то есть осуществлением обратной связи по скорости. Такие схемы иногда применяют в прецизионных приборах, например, в наземных гироскопах. Однако источник питания в них оказывается достаточно сложным.

Другим недостатком асинхронных гидродвигателей можно считать достаточно большое время разгона без применения специальных мер, что объясняется трудностью получения у них одновременно жесткой механической характеристики в зоне рабочих скоростей и большого пускового момента.

С середины 50-х годов на основе проведенных обстоятельных исследований и усовершенствования синхронных гистерезисных двигателей они получили достаточно широкое применение, в том числе и в гиromоторах. Однако удовлетворительными характеристиками, сравнимыми с ха-

ра характеристиками асинхронных гидродвигателей, синхронные гистерезисные гидродвигатели обладают лишь в малогабаритном исполнении.

Гистерезисные гидродвигатели хорошо пускаются и при постоянной частоте питающего напряжения обладают абсолютно жесткой механической характеристикой, обеспечивающей в этом случае абсолютную стабильность скорости вращения, а, следовательно, и кинетического момента, в условиях изменяющихся в определенных пределах моментов сопротивления, давления, температуры окружающей среды, амплитуды напряжения питания.

Синхронные гистерезисные гидродвигатели, как и асинхронные, выполняют по обращенной схеме. Их статор по своему конструктивному выполнению аналогичен статору асинхронного гидродвигателя. Ротор набирается из листов магнитотвердого материала типа викаллой, которые закрепляются в массивном металлическом (стальном или латунном) ободе.

К недостаткам гистерезисных гидродвигателей, ограничивающих области их применения, следует отнести сравнительно низкие их энергетические показатели: коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. Кроме того, эти двигатели имеют колебания мгновенной угловой скорости вращения ротора, что не всегда допустимо.

Сравнительно недавно появившиеся бесколлекторные гидродвигатели постоянного тока с электронным коммутатором также находят в настоящее время применение. Их распространение связано с большими достижениями электроники. По своему принципу действия бесколлекторные гидродвигатели постоянного тока принципиально не отличаются от обычных бесколлекторных двигателей постоянного тока, которые рассматриваются в третьей главе. Их отличительной особенностью является наличие ротора с большим моментом инерции и работа с большими скоростями вращения.

2.4. Тихоходные двигатели

Обычно для увеличения полезной мощности двигателя при тех же габаритах их стремятся выполнить высокооборотными. Особенно это относится к бортовым автоматическим системам, которые питаются от источников повышенной частоты 400...1000 Гц и более. При этом в большинстве случаев получаемые скорости вращения ротора не могут быть непосредственно использованы исполнительными механизмами, поэтому между двигателем и нагрузкой устанавливается механический редуктор. В большинстве случаев это нежелательно, так как приводит к снижению коэффициента полезного действия привода, увеличивает габариты и массу, уменьшает точность, в некоторых схемах приводит к увеличению возмущающего момента, ведет к повышению уровня шума. Значительная ре-

дукция скорости за счет соответствующего увеличения числа пар полюсов весьма затруднительна прежде всего по конструктивным соображениям.

В настоящее время созданы и используются конструкции микродвигателей с низкими скоростями вращения без механического редуктора. К ним относятся индукторные двигатели, двигатели с катящимся ротором и волновые двигатели.

Несмотря на то, что эти двигатели позволяют получить довольно значительное уменьшение частоты вращения ротора по сравнению с частотой подводимого напряжения, им присущи те или иные довольно существенные недостатки, ограничивающие их применение по сравнению с обычными двигателями.

Индукторными двигателями принято называть электрические машины с зубчатым безобмоточным ротором, у которого все обмотки расположены в пазах статора. Электромагнитная связь между обмотками статора осуществляется за счет изменения магнитной проводимости воздушного зазора при вращении зубчатого ротора, выполняющего роль модулятора магнитного поля. Иногда эти двигатели называют редукторными или двигателями с электромагнитной редукцией. В отличие от обычных индукторных двигателей имеют весьма низкие скорости вращения ротора

В индукторных микродвигателях осуществляется электромагнитное редуцирование угловой скорости ротора по отношению к угловой скорости первой гармоники поля статора. Это достигается путем использования в качестве рабочих не первой, а высших, зубцовых гармоник магнитного поля, которые усиливаются за счет определенной конфигурации поверхностей статора и ротора. Как известно, число полюсов поля высшей пространственной гармоники пропорционально, а угловая скорость обратно пропорциональна ее порядку.

Для уяснения принципа электромагнитной редукции скорости рассмотрим магнитную систему, состоящую из двух коаксиальных магнитопроводящих цилиндров, имеющих равномерно расположенные зубцы (рис. 2.26). Пусть число зубцов ротора z_p больше числа зубцов статора z_c . Взаимное расположения ротора и статора, при котором их зубцы совпадают, соответствует максимуму магнитной проводимости (рис. 2.26,а).

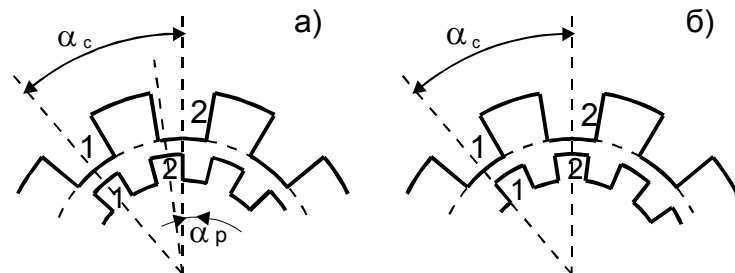


Рис. 2.26. В пояснение принципа электромагнитной редукции

соответствует максимуму магнитной проводимости (рис. 2.26,а).

Повернем ротор на угол $\alpha_p = 2\pi/z_c - 2\pi/z_p$ (рис. 2.26,б). При этом совпадут два следующих зубца статора и ротора, а это эквивалентно тому, что положение максимальной магнитной

проводимости сместилось на угол $\alpha_c = 2\pi/z_c$, который может быть значительно больше угла поворота ротора. Положим, что на статоре имеется обмотка с малым числом пар полюсов, которая может создать поле, вращающееся со скоростью изменения магнитной проводимости, а это означает, что можно получить двигатель, скорость ротора которого значительно меньше скорости поля. В данном случае отношение $k_p = \alpha_c / \alpha_p = \omega_c / \omega_p = z_p / (z_p - z_c)$ называется коэффициентом электромагнитной редукции и при сравнительно небольших габаритах машины достигает значительной величины.

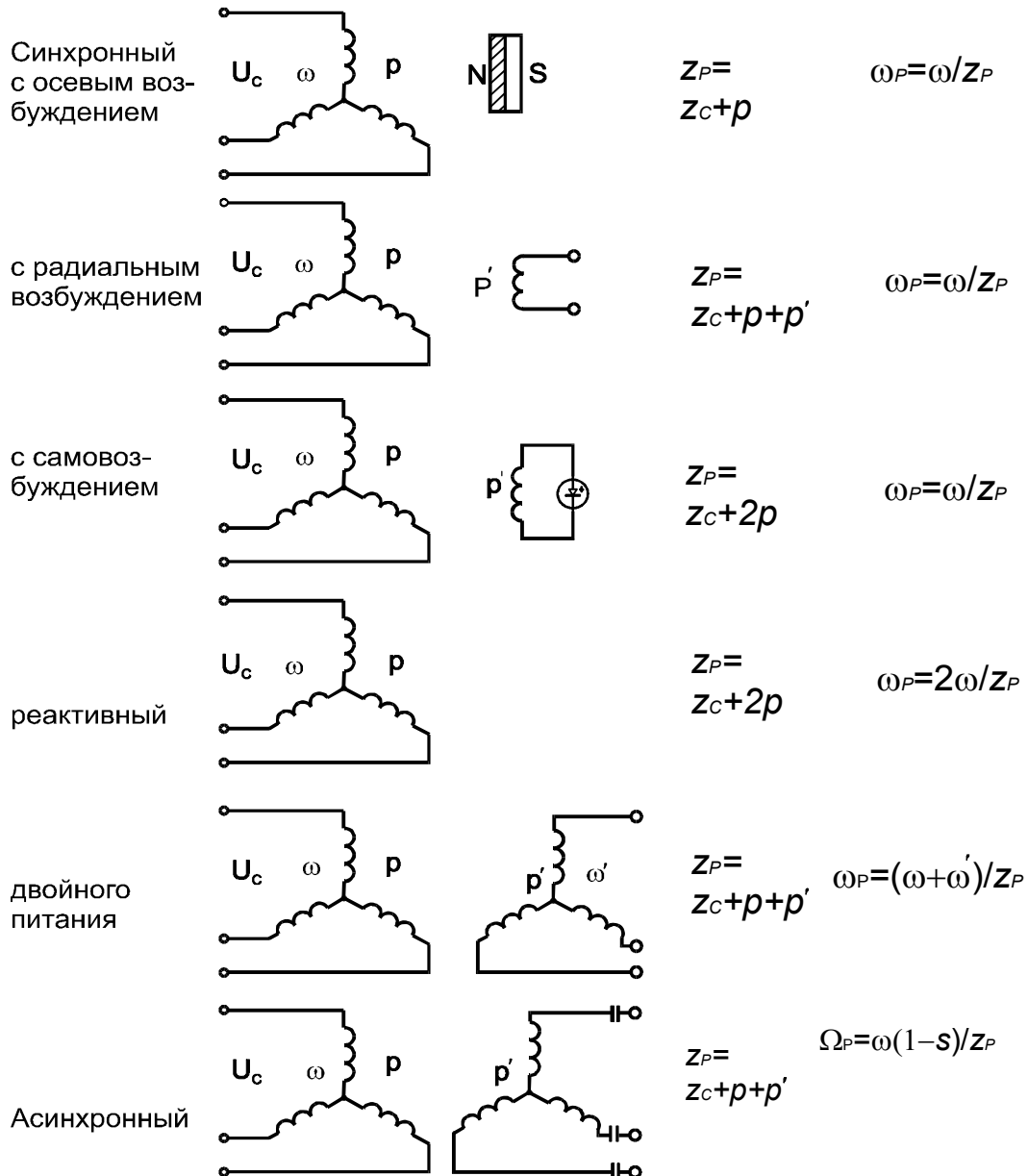


Рис.2.27. Схемы редукторных двигателей

Во всех типах индукторных двигателей число пар полюсов всех обмоток и число зубцов статора и ротора должно быть однозначно согласовано.

В общем случае на статоре индукторного двигателя имеется две системы обмоток – первичная и вторичная. Первичная система обмоток при подключении к соответствующему источнику переменного тока создает вращающееся магнитное поле. Способы включения вторичной системы обмоток определяют тип индукторного двигателя. В настоящее время предложено большое число различных модификаций индукторных двигателей и воспроизведены практически все типы обычных двигателей переменного тока.

В зависимости от режима работы индукторные машины могут быть классифицированы на силовые и исполнительные.

На рис. 2.27 представлены схемы основных типов силовых индукторных двигателей, определяемые способом включения вторичной обмотки.

Рассмотрим простейший тип индукторного *асинхронного* двигателя с гладким статором и зубчатым ротором. Пусть многофазные первичные и вторичные обмотки имеют

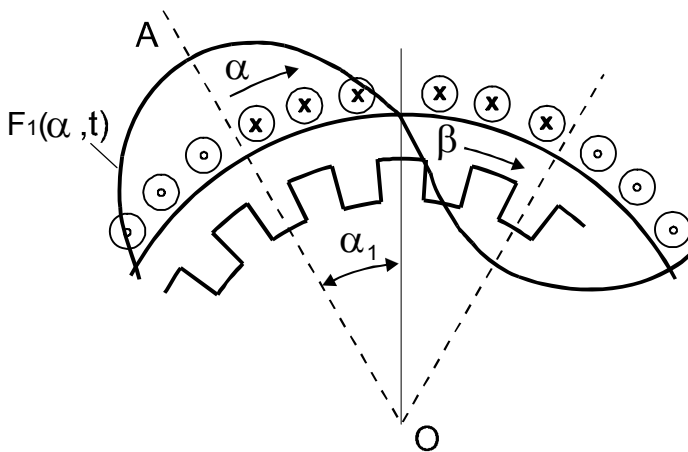


Рис.2.28. К определению магнитной индукции в воздушном зазоре индукторного двигателя

числа пар полюсов p_1 и p_2 . Для устранения трансформаторной связи между обмотками по первой гармонике намагничивающей силы числа пар полюсов обмоток выбираются из условий $p_1=2kp_2$ и $p_2=2kp_1$, где k -целое число. Ротор имеет z_p зубцов.

Найдем индукцию магнитного поля в воздушном зазоре при следующих допущениях (рис. 2.28):

1) намагничивающая сила первичной обмотки статора имеет синусоидальное распределение и может быть выражено формулой

$$F_1 = F_{1m} \cos(p_1 \alpha - \omega t),$$

где α - угол, отсчитываемый по окружности статора;

2) магнитная проводимость воздушного зазора вследствие зубчатости ротора имеет постоянную составляющую и первую зубцовую гармонику, то есть

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 \cos z_p \beta,$$

где β - угол по окружности ротора, отсчитываемый от оси зубца; $\beta = \alpha - \alpha_1 = \alpha - \omega_p t - \alpha_0$, где α_0 – угол между осью зубца и лучом OA , отвечающим максимуму намагничивающей силы.

Тогда имеем

$$\begin{aligned} B &= \lambda F_1 = \lambda_0 F_{1m} \cos(p_1 \alpha - \omega t) + \lambda_1 F_{1m} \cos(\alpha - \omega_p t - \alpha_0) \cos(p_1 \alpha - \omega t) = \\ &= \lambda_0 F_{1m} \cos(p_1 \alpha - \omega t) + (\lambda_1 F_{1m} / 2) \cos\left[\left(z_p - p_1\right) \alpha + \left(\omega - z_p \omega_p\right) t - z_p \alpha_0\right] + \\ &\quad + (\lambda_1 F_{1m} / 2) \cos\left[\left(z_p + p_1\right) \alpha - \left(\omega - z_p \omega_p\right) t - z_p \alpha_0\right]. \end{aligned}$$

Из полученного выражения следует, что магнитное поле в воздушном зазоре содержит три составляющие: основное вращающееся магнитное поле с числом периодов по окружности статора, равным числу пар полюсов первичной обмотки, и два вращающихся магнитных поля, возникающих вследствие зубчатости ротора. Одно из этих полей имеет число периодов по окружности статора $z_p - p_1$ и вращается при $z_p \omega_p < \omega$ в сторону, противоположную направлению вращения основного магнитного поля; другое – с числом периодов $z_p + p_1$ – вращается в направлении основного магнитного поля. Последние две составляющие магнитного поля могут взаимодействовать со вторичной обмоткой двигателя, если ее число пар полюсов равно $p_2 = z_p \pm p_1$. Обычно по конструктивным соображениям выбирают меньшее число пар полюсов, поэтому $p_2 = z_p - p_1$ или $z_p = p_1 + p_2$. В этом случае электромагнитное взаимодействие между вторичной и первичной системами обмоток осуществляется за счет зубцовой гармоника магнитного поля, вращающейся навстречу основному магнитному полю. Подчеркнем, что такое взаимодействие возможно только при определенном соотношении между числами пар полюсов всех обмоток и количеством зубцов ротора.

При замыкании вторичной обмотки на некоторое сопротивление в нее будет передаваться электромагнитная мощность. Поскольку эта гармоника "генерируется" зубчатым ротором, то к нему будет приложен электромагнитный момент в направлении основного вращающегося магнитного поля. Угловая частота эдс и токов, индуцируемых во вторичной обмотке, $\omega_2 = \omega - z_p \omega_p$. При вращении ротора со скоростью, лежащей в диапазоне от 0 до ω / z_p , угловая частота тока вторичной обмотки изменяется от ω до 0.

По аналогии с обычными асинхронными двигателями введем понятие скольжения

$$s_2 = \frac{\omega_{pc} - \omega_p}{\omega_{pc}} = \frac{\omega / z_p - \omega_p}{\omega / z_p} = \frac{\omega - z_p \omega_p}{\omega} = \frac{\omega_2}{\omega}. \quad (2.7)$$

Из изложенного следует, что в индукторных асинхронных двигателях угловая скорость ротора в режиме холостого хода $\omega_{p0} \approx \omega / z_p$, где $z_p = p_1 + p_2 = (1 + 2k)p_1$. В аналогичном двигателе с ротором типа "беличья клетка" угловая скорость холостого хода равна ω / p_1 , то есть в $1 + 2k$ раз больше.

Для получения более низких скоростей вращения в асинхронных

индукторных двигателях делают открытые пазы также и на статоре. В этом случае z_p увеличивается на число пазов статора и коэффициент электромагнитной редукиции значительно возрастает.

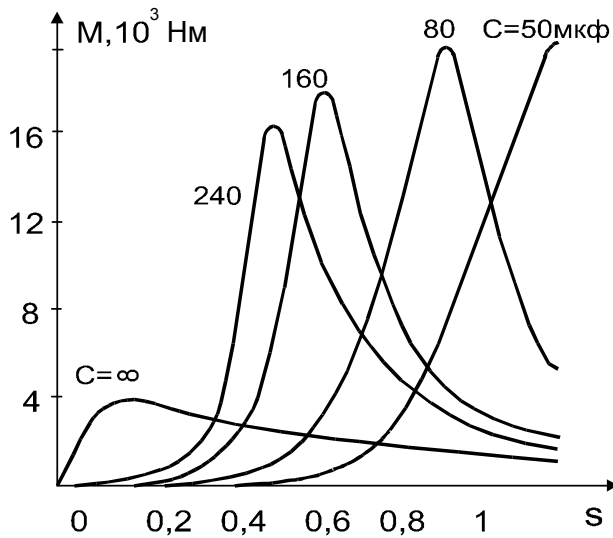


Рис. 2.29. Механические характеристики асинхронного индукторного двигателя

Вращающий момент асинхронного двигателя зависит от силы тока во вторичной обмотке, а, следовательно, и от ее сопротивления. С целью уменьшения реактивного сопротивления вторичной обмотки в ее цепь обычно включают для компенсации индуктивности конденсаторы. При этом величины емкостей конденсаторов значительно влияют на величину пускового и максимального моментов (см. рис. 2.29). Значения емкостей конденсаторов приходится применять достаточно большими.

Синхронные индукторные микродвигатели, называемые также субсинхронными, в зависимости от способа включения вторичной обмотки и конструктивных особенностей можно разделить на:

- двигатели с осевым возбуждением постоянными магнитами;
- двигатели с радиальным возбуждением, которые, в свою очередь, делятся на двигатели с обмоткой возбуждения и с самовозбуждением;
- реактивные двигатели;
- двигатели двойного питания.

Субсинхронные двигатели с возбуждением постоянным током имеют в пазах статора две обмотки. Одна обмотка — основная, с числом пар полюсов p_1 , трехфазная или двухфазная, питается от сети переменного тока с частотой f_1 и создает вращающееся магнитное поле. Вторая обмотка — возбуждения, имеет число пар полюсов $p_2 > p_1$. Она однофазная, питается от сети постоянного тока и создает неподвижное в пространстве магнитное поле. Статор выполняется либо гладким (с закрытыми пазами), либо зубчатым — с открытыми пазами. Ротор двигателя имеет открытые пазы.

Скорость вращения ротора

$$n_{2c} = 60f_1 / z_p \quad (2.8)$$

Она значительно меньше синхронной скорости вращения n_1 обычного синхронного двигателя с числом пар полюсов p , у которого $n_1 = 60f/p$.

В случае двухсторонней зубчатости коэффициент электромагнитной редукиции вследствие большей величины z_p значительно больше, чем в случае односторонней зубчатости.

Субсинхронный двигатель с самовозбуждением — это двигатель, у

которого обмотка возбуждения имеет трансформаторную связь с основной обмоткой и замкнута накоротко через выпрямитель. Трансформаторная связь обеспечивается соответствующим выбором числа пар полюсов p_1, p_2 .

Этот двигатель по своим рабочим характеристикам уступает субсинхронному двигателю, у которого обмотка возбуждения питается от источника постоянного тока, что объясняется пульсацией тока возбуждения при его выпрямлении.

Субсинхронные двигатели с постоянными магнитами обычно выполняются обращенными в отношении их возбуждения (постоянные магниты с числом пар полюсов p_2 , отличным от числа пар полюсов обмотки переменного тока p_1 , располагаются не на статоре, что трудно выполнимо, а на роторе). Принцип действия двигателя при этом по существу остается прежним. Вращающий момент создается за счет взаимодействия зубцовых гармоник статора с зубцовыми гармониками ротора, имеющими одинаковый порядок.

При питании обеих статорных обмоток переменным током разной частоты f_1 и f_2 субсинхронный двигатель может работать как двигатель двойного питания и скорость вращения ротора определяется выражением

$$n_{2c} = 60(f_1 \pm f_2)/z_p. \quad (2.9)$$

При небольшой разности частот может быть получена очень низкая скорость вращения ротора – десятки и даже единицы оборотов в минуту.

Как и обычные синхронные двигатели, индукторные двигатели могут работать и при отсутствии возбуждения (постоянным током или постоянными магнитами) – как реактивные. Если для работы обычного реактивного двигателя необходимы явно выраженные полюсы, то для работы индукторного реактивного двигателя необходимы открытые пазы и на роторе и на статоре.

У реактивного индукторного двигателя рабочая обмотка является одновременно и обмоткой возбуждения ($f_1 = f_2, p_1 = p_2$). Для него

$$z_p - z_c = 2p; \quad \omega_p = 2\omega/z_p; \quad k_p = z_p/(2p). \quad (2.10)$$

Индукторные синхронные реактивные двигатели, так же как и обычные реактивные двигатели, развивают меньшую механическую мощность и имеют худшие энергетические показатели, чем двигатели с возбуждением. Их основные положительные качества – простота устройства и более низкая стоимость.

Одним из существенных недостатков субсинхронных двигателей, также как и обычных синхронных, является трудность их пуска. При всех скоростях вращения, кроме синхронной, вращающий момент является пульсирующим. На практике чаще всего используется асинхронный пуск субсинхронных двигателей, для чего на его роторе размещается короткозамкнутая обмотка, сопротивление которой подбирается таким образом, чтобы асинхронный момент от вращающегося магнитного поля рабочей

обмотки при рабочей скорости ротора был меньше максимального синхронного момента, но больше момента сопротивления нагрузки. Для получения такого асинхронного момента критическое скольжение выбирают достаточно большим – $s_k=7\dots 10$. Под действием асинхронного момента ротор двигателя раскручивается до скорости, близкой к синхронной, и затем под влиянием синхронного момента входит в синхронизм. В отличие от синхронного двигателя обычной конструкции асинхронный момент субсинхронного двигателя в синхронном режиме не равен нулю, так как по отношению к вращающемуся полю ротор вращается со скольжением, близким к единице.

Для субсинхронных двигателей важен не только пуск, но и синхронизация ротора, так как его ротор, достигнув синхронной скорости вращения, может не засинхронизироваться, а под действием асинхронного момента от основного поля пройти эту скорость и далее вращаться с асинхронной скоростью, значительно превосходящей номинальную скорость вращения. Для синхронизации ротора при номинальной скорости вращения необходимо вполне определенное соотношение между моментом нагрузки, максимальным синхронизирующим моментом, асинхронным моментом при пуске и моментом инерции вращающихся частей.

По своим рабочим свойствам индукторные двигатели уступают обычным двигателям. Они имеют более низкие энергетические показатели. Это объясняется тем, что основная волна магнитного поля обмотки переменного тока является нерабочей, а также тем, что кроме высших рабочих гармоник в кривой магнитного поля вследствие открытых пазов на статоре и роторе имеется целый спектр гармоник поля самых различных порядков и скоростей вращения, которые, как правило, отрицательно влияют на рабочие свойства двигателей.

Серьезным недостатком индукторных двигателей является также то, что мгновенная скорость вращения их ротора вследствие открытых пазов статора и ротора не остается постоянной в течение одного оборота, то есть мгновенная скорость вращения ротора у них весьма нестабильна. Например, у реактивных индукторных микродвигателей нестабильность $N=(40\dots 80)10^{-3}$.

Низкие энергетические показатели, а также низкая скорость вращения ротора не позволяют создавать интенсивную самовентиляцию, что приводит к необходимости увеличения габаритов и массы индукторных двигателей.

Несмотря на наличие серьезных недостатков, индукторные микродвигатели с электромагнитной редукцией скорости вращения находят достаточно широкое применение, потому что при малых габари-

тах, которые имеют микродвигатели, практически невозможно создать какие-либо тихоходные двигатели, которые не имели бы тех или иных недостатков.

В микродвигателях с катящимся ротором (ДКР) редуцирование угловой скорости ротора по отношению к угловой скорости магнитного поля объясняется тем, что ротор расположен эксцентрично в расточке статора и имеет возможность катиться вдоль окружности статора. Основной электромагнитный вращающий момент создается за счет сил одностороннего магнитного притяжения ротора к статору несимметричным вращающимся магнитным полем.

Допустим, что магнитное поле в зазоре между статором и ротором несимметрично и имеет максимум, который в некоторый момент времени совпадает с точкой A на статоре (рис.2.30,а).

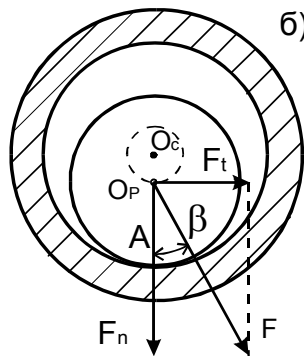
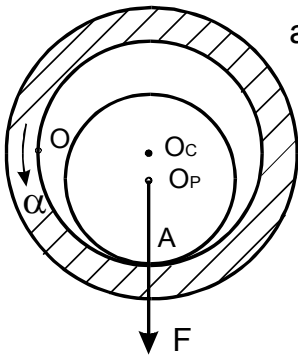


Рис.2.30. К образованию вращающего момента в двигателе с катящимся ротором

несимметрично и имеет максимум, который в некоторый момент времени совпадает с точкой A на статоре (рис.2.30,а). В этом случае под действием силы магнитного притяжения ротор притягивается к точке A статора. При повороте магнитного поля на угол β сила магнитного притяжения повернется также на угол β (рис.2.30,б). Эту силу можно разложить на две составляющих: нормальную F_n и тангенциальную F_t . Под действием тангенциальной силы ротор будет обкатываться по внутренней поверхности статора синхронно с полем. Также синхронно с полем по малой окружности с центром O_c будет перемещаться и центр ротора O_p . При этом ротор будет вращаться вокруг своей оси в обратном направлении с угловой скоростью ω_p , которая значительно меньше угловой скорости поля ω_c :

Под действием тангенциальной силы ротор будет обкатываться по внутренней поверхности статора синхронно с полем. Также синхронно с полем по малой окружности с центром O_c будет перемещаться и центр ротора O_p . При этом ротор будет вращаться вокруг своей оси в обратном направлении с угловой скоростью ω_p , которая значительно меньше угловой скорости поля ω_c :

$$\omega_p = \omega_c (D_c - D_p) / D_p. \quad (2.11)$$

Поскольку $D_c - D_p \ll D_p$, то скорость ротора ДКР может быть сделана весьма малой. У современных микродвигателей коэффициент редуцирования достигает 1500.

Конструкция реальных ДКР в значительной мере определяется методом получения несимметричного вращающегося поля, устройством поверхностей обкатывания и механизма передачи несоосного вращения ротора.

Несимметричное вращающееся магнитное поле, необходимое для работы ДКР, обычно получают путем наложения униполярного магнитного поля на круговое вращающееся поле двухполюсной машины. В реальных конструкциях двигателей с катящимся ротором пакет стали ротора не соприкасается с пакетом стали статора. При

вращении ротора осуществляется обкатывание специального катка ротора по неподвижному кольцу на корпусе двигателя. При определении угловой скорости ротора в формулу (2.11) надо подставлять диаметры катка ротора и кольца статора.

ДКР по существу является синхронным двигателем – скорость вращения его ротора при отсутствии механического проскальзывания поверхностей качения является постоянной. При постоянной скорости поля уменьшение скорости вращения ротора, то есть переход в асинхронный режим, возможно только за счет механического проскальзывания. Механическая характеристика ДКР во многом определяется устройством катков. Если их поверхности зубчатые, то есть проскальзывание исключено, то двигатель работает только как синхронный. Его механическая характеристика предельно жесткая. Если поверхности катков гладкие, то двигатель может работать и как синхронный, и как асинхронный. Вид его механических характеристик во многом зависит от материала катков.

Как у всех синхронных двигателей, при увеличении момента нагрузки ротор ДКР продолжает вращаться с прежней угловой скоростью, но точка соприкосновения отстает от оси поля на больший угол. Если момент нагрузки превысит максимальный момент двигателя, то он выходит из синхронизма.

Основное достоинство двигателей с катящимся ротором – это возможность его использования в безредукторном электроприводе. Важным положительным свойством ДКР является также его способность к самоторможению при остановке.

Основными недостатками ДКР являются быстрый износ катков вследствие проскальзывания поверхностей соприкосновения; необходимость применения специальных передач или муфт для передачи вращающего момента от оси ротора, совершающей круговые движения в пространстве на выходной вал, ось которого не должна иметь круговых движений; значительные вибрации и шум двигателя. Коэффициент полезного действия зависит от конструкции двигателя и номинальной скорости вращения ротора. При низких номинальных скоростях (2...10 об/мин) он мал (1...5%), а при высоких (100...200 об/мин) значительно выше (до 30...40%). Коэффициент мощности $\cos\varphi$ также колеблется в весьма широких пределах – от 0,2 до 0,8.

Синхронные *волновые* двигатели (ВД) представляют собой конструктивное объединение электрической машины и волновой зубчатой передачи. Особенностью конструкции таких двигателей является то, что их ротор, выполненный в виде стакана из ферромагнитного сплава, может деформироваться в радиальном направлении под действием сил магнитного тяжения. Непосредственно на поверхности гибкого ротора крепится гибкий зубчатый венец волновой передачи. Генератором механических

волн в ВД является статор с многофазной обмоткой, образующей вращающееся или пульсирующее магнитное поле.

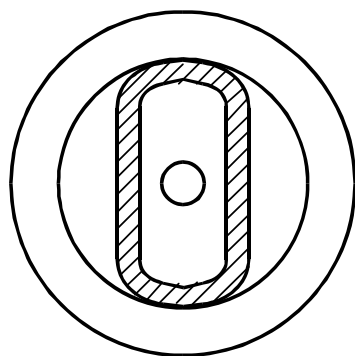


Рис.2.31. Схема двигателя с гибким волновым ротором

Рассмотрим статор с многофазной обмоткой, образующей в его расточке двухполюсное вращающееся магнитное поле. В расточке статора находится тонкостенный гибкий стальной полый ротор (рис. 2.31). Под действием сил магнитного тяжения в местах, соответствующих максимуму индукции, ротор, деформируясь, притягивается к статору. Волна деформации ротора будет перемещаться синхронно с магнитным полем, при этом ротор обкатывается по статору, касаясь его в двух точках. Так же как в двигателях с катящимся ротором, за один оборот поля ротор повернется в противоположную сторону на

угол, равный разности длин окружностей статора и ротора, деленной на радиус ротора. Угловая скорость ротора определяется по формуле (2.11). Медленное вращение ротора вокруг своей оси с помощью специальных устройств несложно передать на вал двигателя. В двигателях с гибким волновым ротором, так же как и в ДКР, применяются катки, которые могут быть либо зубчатыми, либо гладкими.

В отличие от ДКР волновой двигатель может работать не только в двухполюсном, но и в многополюсном поле.

Существенным достоинством ВД является отсутствие быстровращающихся частей и подшипников, что значительно повышает их надежность. Эти двигатели имеют хорошие динамические характеристики. Например, время пуска микродвигателя с номинальной частотой 50 Гц достигает 3...4 мс. При отключении напряжения питания волна деформации исчезает очень быстро и ротор останавливается практически без выбега. Центры вращения ротора и вращающегося магнитного поля в ВД, в отличие от ДКР, совпадают, вследствие этого отсутствуют неуравновешенные центробежные силы, что обеспечивает работу двигателя без вибраций и шума.

Недостатком ВД является сложность конструкции и технологии изготовления, связанная в основном с требованием обеспечения необходимой эластичности ротора. Энергетические показатели волновых двигателей невысоки, особенно у двигателей реактивного типа, вследствие больших немагнитных зазоров на пути магнитного потока и особенностей конструкции внешнего и внутреннего магнитопроводов. Коэффициент полезного действия и масса на единицу развиваемой мощности у ВД сильно зависят от реализуемого коэффициента редуцирования скорости: чем больше коэффициент редуцирования, тем хуже эти показатели.

Глава 3. Исполнительные (управляемые) двигатели

В системах автоматики, в схемах управления, регулирования и контроля в настоящее время находят широкое применение самые различные исполнительные двигатели (ИД), отличающиеся по роду тока, частоте питающей сети, скорости вращения, конструктивному исполнению и др.

Особенностью ИД, работающих обычно в следящих системах, является то, что они практически никогда не работают в номинальном режиме – при номинальной скорости вращения. Для их работы, в отличие от силовых двигателей, характерны частые пуски, остановки, реверсы. С целью сокращения времени переходных процессов, в которых почти постоянно находятся исполнительные двигатели, их стремятся выполнить малоинерционными.

В настоящее время в качестве исполнительных двигателей наиболее часто используются:

- 1) двухфазные асинхронные двигатели с повышенным сопротивлением ротора;
- 2) двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или постоянными магнитами;
- 3) синхронные – шаговые двигатели.

В некоторых случаях в мощных следящих системах используются трехфазные асинхронные исполнительные двигатели.

Весьма специфическими исполнительными двигателями являются так называемые моментные двигатели (датчики момента) – ИД, работающие в режиме короткого замыкания (при невращающемся роторе) или близком к нему.

Характер требований, предъявляемых к ИД, определяется спецификой их работы в следящих системах. Такие требования, как максимум полезной мощности, высокий коэффициент полезного действия, которые являются основными для силовых двигателей, у исполнительных двигателей смещаются на второй план.

К ним предъявляются следующие основные требования:

- отсутствие самохода, то есть отсутствие вращения ротора после снятия сигнала с обмотки управления;
- широкий диапазон регулирования скорости вращения;
- устойчивость работы во всем диапазоне скоростей;
- линейность механических и регулировочных характеристик;
- высокое быстродействие;
- малая мощность управления;
- малое напряжение трогания;

- сохранение характеристик при изменении в достаточно широком диапазоне температуры, давления, влажности;
- неизменность характеристик при любом пространственном положении двигателя;
- отсутствие радиопомех;
- малые габариты и масса;
- высокая надежность.

Необходимость строгого выполнения тех или иных требований определяется назначением и областью применения ИД.

3.1. Исполнительные двигатели постоянного тока

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока при-

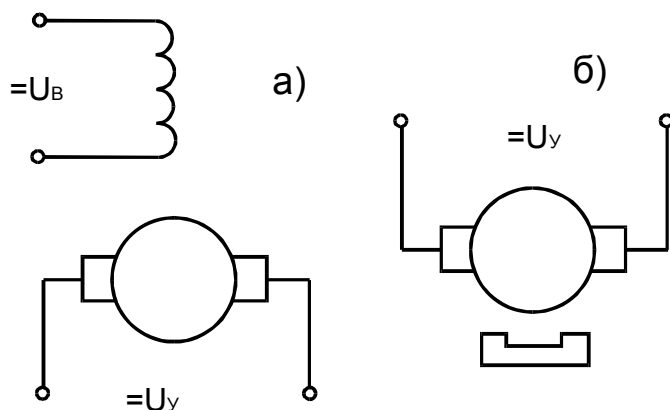


Рис.3.1.Электрические схемы включения исполнительных ДПТ с электромагнитным (а) и магнитоэлектрическим возбуждением (б)

меняются двигатели с независимым возбуждением и якорным управлением. В зависимости от способа создания потока возбуждения (электромагнитом или постоянным магнитом), различают двигатели с электромагнитным возбуждением и двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением. Схемы их включения приведены на рис.3.1.

К положительным качествам исполнительных двигателей постоянного тока относятся следующие:

- возможность получения (теоретически) любых, сколь угодно малых и больших скоростей вращения;
- возможность просто, плавно, экономично и в широком диапазоне регулировать скорость вращения;
- устойчивость работы практически при любых скоростях вращения;
- линейность механических и регулировочных характеристик;
- отсутствие самохода;
- значительный пусковой момент;
- малые габариты и масса – значительно меньшие, чем у исполнительных двигателей переменного тока;
- сравнительно небольшая электромеханическая постоянная времени.

Основным недостатком наиболее распространенных *коллекторных* исполнительных двигателей постоянного тока, ограничивающих их использование, является наличие у них скользящих контактов – коллектора

и щеток, резко снижающих надежность двигателя, ресурс его работы и вызывающих появление радиопомех.

В качестве их недостатка можно также отметить более сложный усилитель, необходимый для работы исполнительного двигателя, чем при использовании исполнительных двигателей переменного тока.

По конструкции якоря коллекторные исполнительные двигатели можно разделить на двигатели с якорем обычного исполнения (барabanным) – с полуоткрытыми пазами на его цилиндрической поверхности; двигатели с гладким якорем, у которых якорная обмотка расположена непосредственно на шихтованном гладком цилиндрическом ярме и укреплена на нем с помощью клея; двигатели с малоинерционными якорями (цилиндрическими полыми и дисковыми), у которых при их работе вращается лишь обмотка якоря с коллектором, а ярмо якоря остается неподвижным.

Кроме коллекторных (контактных) исполнительных двигателей постоянного тока в настоящее время широко используются бесколлекторные двигатели постоянного тока, у которых механический коллектор заменен электронным коммутатором с датчиком положения ротора.

Магнитная цепь в исполнительных двигателях выполняется ненасыщенной. Кроме того, в связи с малой мощностью реакцией якоря можно пренебрегать, так как она ничтожно мала.

3.1.1. Характеристики исполнительных двигателей постоянного тока с якорным управлением

Учитывая замечания в отношении насыщения магнитной цепи и размагничивающего действия реакции якоря, можно считать, что поток возбуждения пропорционален напряжению возбуждения: $\Phi_B = C_\Phi U_B$, где C_Φ – постоянная величина.

Чтобы вид характеристики не зависел от номинальной мощности и конструктивных особенностей двигателей, удобно пользоваться относительными (безразмерными) единицами.

Напряжением управления в относительных единицах (коэффициентом сигнала) будем называть отношение напряжения управления U_Y , подаваемое в якорь, к напряжению возбуждения U_B (для двигателей с электромагнитным возбуждением): $\alpha = U_Y / U_B$. Для двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением $\alpha = U_Y / U_{НОМ}$. Тогда из выражений (1.35), (1.39) получим

$$I_Y = (\alpha U_B - C_E \cdot C_\Phi \omega U_B) / R_Y, \quad M = (C_M C_\Phi \alpha U_B^2 - C_M C_E C_\Phi^2 U_B^2) / R_Y.$$

Моментом двигателя в относительных единицах будем называть отношение электромагнитного момента к пусковому моменту двигателя M_{K0}

(при неподвижном роторе) при $\alpha=1$, принятому за единичный момент:

$$m = M/M_{K0} = \alpha - C_E C_\Phi \omega.$$

За единицу скорости в относительных единицах примем скорость холостого хода ω_0 , то есть скорость ненагруженного двигателя при $\alpha=1$:

$$\omega_0 = 1/C_E \cdot C_\Phi.$$

Скорость вращения якоря в относительных единицах будет $v = \omega / \omega_0$.

Скорость холостого хода является величиной постоянной и вполне определенной для каждого двигателя.

Учитывая все вышеизложенное, уравнение механической характеристики в безразмерной форме принимает вид

$$m = \alpha - v, \quad (3.1)$$

а уравнение регулировочной характеристики

$$v = \alpha - m. \quad (3.2)$$

Из уравнения (3.1) видно, что вращающий момент исполнительного двигателя с якорным управлением является линейной функцией скорости вращения и коэффициента сигнала.

На рис. 3.2 изображено семейство механических характеристик исполнительного двигателя с якорным управлением

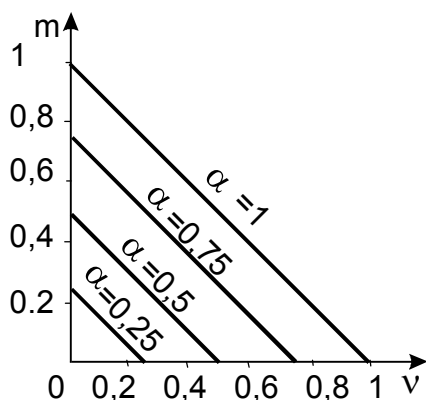


Рис. 3.2. Механические характеристики двигателя с якорным управлением

полнительного двигателя с якорным управлением $M/M_{K0} = f(\omega/\omega_0)$. Максимальный (пусковой) момент двигателя в относительных единицах равен коэффициенту сигнала $M/M_{K0} = \alpha = U_Y/U_B$, так как $\omega=0$. Следовательно, пусковой момент пропорционален напряжению управления U_Y механические характеристики двигателя смещаются параллельно самим себе в сторону меньших скоростей и моментов. Жесткость (наклон) характеристик при этом не меняется.

Регулировочные характеристики исполнительного двигателя с якорным управлением (см. выражение (3.2)) также имеет линейный характер и скорость вращения пропорциональна напряжению управления. Тангенс угла наклона прямых равен $1/C_E$. При идеальном холостом ходе характеристика проходит через начало координат.

Двигатель, имеющий нагрузку на валу, начнет вращаться только после того, как напряжение управления превысит напряжение трогания U_{TP} , при этом момент двигателя будет равен моменту нагрузки M_H и ток I_Y может быть определен из равенства $M = C_M I_Y \Phi = M_H$, откуда $I_Y = M_H / C_M \Phi$, и для U_{TP} имеем

$$U_{TP} = (M_H / C_M \Phi) \cdot R_Y. \quad (3.3)$$

В пределах от $U_V=0$ до $U_V=\pm U_{TP}$ будет находиться зона нечувствительности. Ширина ее будет тем меньше, чем меньше сопротивление якорной обмотки R_Y и чем больше коэффициент момента C_M . Отметим,

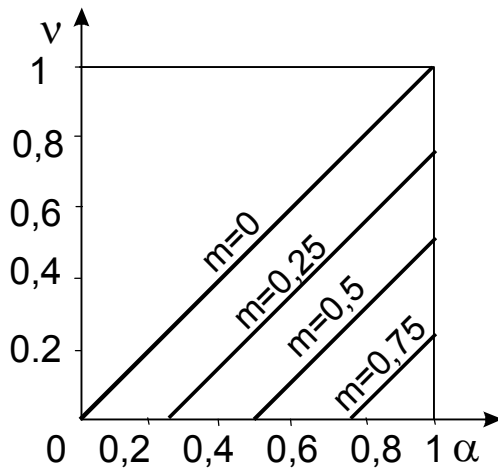


Рис.3.3. Регулировочные характеристики двигателя с якорным управлением

что для микродвигателей величина напряжения трогания может достигать 5% от номинального.

Регулировочные характеристики двигателя постоянного тока с якорным управлением представлены на рис. 3.3.

Линейность механических и регулировочных характеристик исполнительных двигателей постоянного тока с якорным управлением является ценным качеством этих двигателей. Следует отметить, что этим свойством не обладает больше ни один двигатель ни при каких способах управления.

Мощность управления

$$P_V = U_Y I_Y = \alpha U_B \frac{\alpha U_B - v U_B}{R_Y} = \frac{\alpha U_B^2 (\alpha - v)}{R_Y}.$$

Приняв за единичную мощность управления при коротком замыкании ($\omega=0$) и $\alpha=1$, то есть $P_{YK} = U_B^2 / R_Y$, получим мощность управления в относительных единицах

$$p_y = \alpha(\alpha - v). \quad (3.4)$$

График полученной зависимости представлен на рис. 3.4,а.

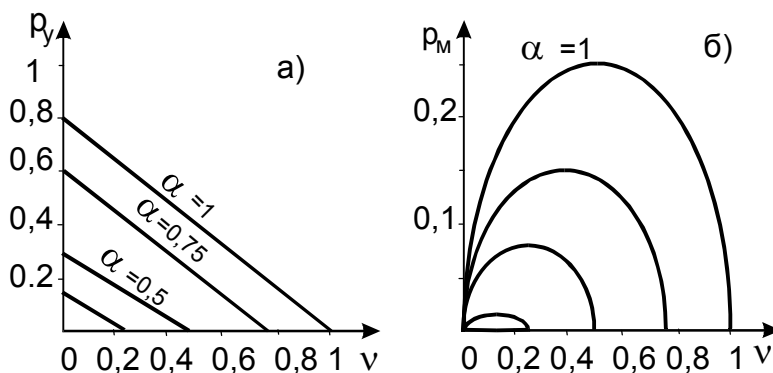


Рис. 3.4. Зависимости мощности управления (а) и механической мощности (б) от относительной скорости вращения при якорном управлении

Эта мощность является почти всей мощностью, потребляемой двигателем, за исключением мощности возбуждения $P_B = I_B^2 R_Y = U_B^2 / R_Y$ (для двигателей с электромагнитным возбуждением), являющейся величиной постоянной и не зависящей от нагрузки. Для двигателей

с постоянными магнитами мощность управления — вся потребляемая мощность.

Сравнительно большая мощность управления является серьезным

недостатком двигателя с якорным управлением, так как при этом требуется усилитель достаточно большой мощности.

Мощность управления резко увеличивается с увеличением коэффициента сигнала.

Механическая мощность исполнительного двигателя в относительных единицах представляет собой произведение относительной скорости вращения на относительный момент:

$$p_m = v \cdot m = v(\alpha - v). \quad (3.5)$$

Величину максимальной механической мощности $p_{m \max}$ и соответствующую скорость вращения $v_{кр}$ можно определить, положив $dp_m/dv=0$. При этом получим

$$p_{m \max} = \alpha^2/4; \quad v_{кр} = 0,5\alpha = 0,5v_0. \quad (3.6)$$

На рис.3.4,б показаны зависимости $p_m = f(v)$ при различных значениях коэффициента сигнала. При пуске ($v=0$) и холостом ходе ($m=0$) она равна нулю.

Максимум механической мощности пропорционален, как и для мощности управления, квадрату коэффициента сигнала. Уменьшение мощности управления за счет уменьшения напряжения управления приводит к уменьшению максимального значения механической мощности, то есть к плохому использованию номинальной мощности двигателя.

Исполнительные двигатели постоянного тока с электромагнитным возбуждением имеют сравнительно высокий коэффициент полезного действия – в двигателях мощностью до 10Вт он равен 25...30%, а в двигателях мощностью 200...250Вт доходит до 60%. Двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением имеют еще больший КПД.

Отметим, что управление исполнительными двигателями с электромагнитным возбуждением возможно также через полюсную обмотку с подачей напряжения возбуждения в якорную обмотку (полюсное управление). Однако такие двигатели не нашли практического применения в схемах автоматики из-за плохих (нелинейных и неоднозначных) механических и регулировочных характеристик.

3.1.2. Импульсное управление исполнительными двигателями постоянного тока

Управление исполнительными двигателями осуществляется с помощью электронной схемы. По способу управления силовыми транзисторными каскадами усилители подразделяются на два основных класса. В усилителях первого класса или так называемых линейных усилителях, биполярные транзисторы силового каскада работают в линейной или активной зоне; в усилителях второго класса биполярные или МДП-транзисторы

работают в режиме переключения.

Мощность выходных каскадов, управляющих исполнительными двигателями, обычно колеблются от нескольких ватт до нескольких десятков ватт. Это очень затрудняет применение линейных выходных каскадов, имеющих в самых благоприятных условиях коэффициент полезного действия не более 50%.

В настоящее время в области миниатюризации усилителей мощности, работающих в режиме линейного усиления, достигнуты значительные успехи, хотя кардинальная миниатюризация может быть осуществлена только при переходе к импульсным методам управления силовыми транзисторами.

В настоящее время в системах автоматического регулирования импульсный способ управления исполнительными двигателями постоянного тока, являющийся разновидностью якорного управления, получил широкое распространение. Это позволяет отказаться от использования линейного усилителя мощности постоянного тока, чем достигается уменьшение габаритов и повышение экономичности системы усилитель-двигатель.

Сущность импульсного способа управления состоит в том, что регулирование скорости вращения достигается не за счет изменения напряжения управления, непрерывно подводимого к якорю двигателя, а за счет изменения времени, в течение которого подводится номинальное напряжение. То есть к якорю подводятся импульсы неизменного по амплитуде напряжения управления U_y , в результате чего его работа состоит из чередующихся периодов разгона и торможения. Если эти периоды малы по сравнению со временем полной остановки и разгона, то устанавливается некоторая средняя угловая скорость ω_{cp} , величина которой при неизменном моменте нагрузки однозначно определяется относительной продолжительностью включения

$$\tau_{и} = t_u / T_{и}, \quad (3.7)$$

где t_u – длительность импульса; $T_{и}$ – период следования импульсов.

Работа любого устройства, предназначенного для усиления мощности электрических сигналов, основана на регулировании количества энергии, поступающей в нагрузку от источника питания. При функционировании усилителей должна быть обеспечена пропорциональность между входным сигналом управления и напряжением на якорной обмотке.

В качестве активных элементов усилителей мощности используются транзисторы. В линейных (аналоговых) усилителях они, как правило, работают в режиме класса В или АВ. Упрощенная схема одного плеча двухтактного линейного усилителя на транзисторах и его эквивалентное представление приведены на рис. 3.5,а,б соответственно. Здесь $U_{п}$ – напряжение источника питания; Z – полное сопротивление обмотки двигателя; $R(t)$ – сопротивление активного управляющего элемента (транзистора).

При линейном управлении в транзисторе в интервале времени T рассеивается мощность
$$P_{РАС} = \frac{I}{T} \int_0^T \frac{U_Z}{z} [U_{П} - U_Z(t)] dt.$$

Тепловые потери на управляющем элементе обращаются в нуль

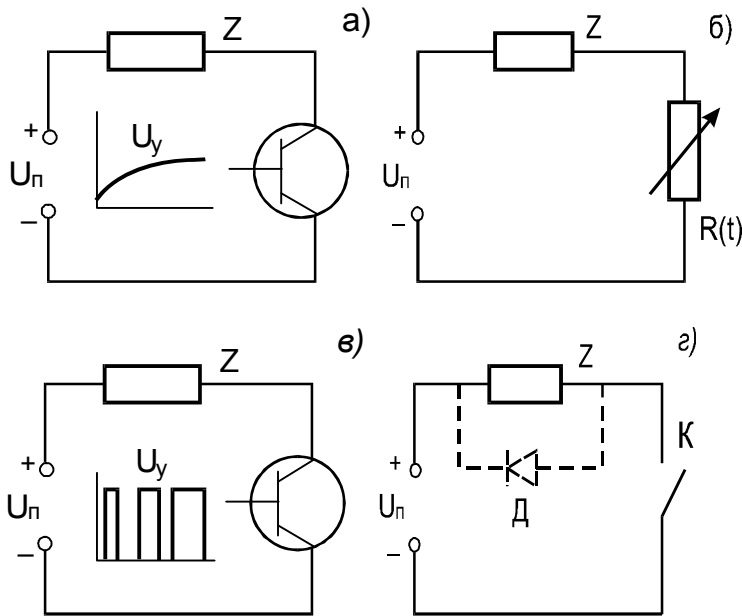


Рис. 3.5. Упрощенная схема одного плеча двух-тактного линейного (а) и ключевого (в) усилителя мощности и их эквивалентные схемы (б,г)

только тогда, когда напряжение на обмотке $U_Z(t)$ равно $U_{П}$ или нулю. Это означает, что максимальный коэффициент полезного действия усилителя может быть достигнут только в том случае, если выходное напряжения представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой $U_{П}$. Управляющий элемент в этом случае работает в ключевом режиме (рис. 3.5, в, г).

Первый вариант усилителя с непрерывными входными сигналами (см. рис. 3.5, а, б) можно условно отнести к категории линейных (аналоговых) усилителей, второй вариант с импульсным входным сигналом (см. рис. 3.5, в, г) – к классу ключевых усилителей с дискретным режимом работы управляющих элементов, сопротивления которых близки к нулю или к бесконечности.

На практике форма управляющего сигнала далека от прямоугольной и его амплитуда может изменяться в широких пределах. Поэтому использование ключевого режима усилителя связано со специальным преобразованием сигнала управления.

В усилительном устройстве, схема которого показана на рис. 3.5, в, энергия поступает в якорную обмотку двигателя дискретными порциями в те интервалы времени, когда транзистор насыщен (замкнутое положение ключа на рис. 3.5, г). Мощность, выделяемая в нагрузке, определяется соотношением времени замкнутого и разомкнутого состояния ключа. Очевидно, что в этом случае напряжение на якорной обмотке имеет форму прямоугольных импульсов с амплитудой $U_{П}$, у которых меняется либо длительность пропорционально величине аналогового сигнала управления, либо частота их следования. Первый способ преобразования аналогового сигнала в импульсный называется широтно-импульсной модуляцией

(см. рис. 3.6), второй – частотно-импульсной модуляцией.

При импульсном способе управления мгновенное значение угловой

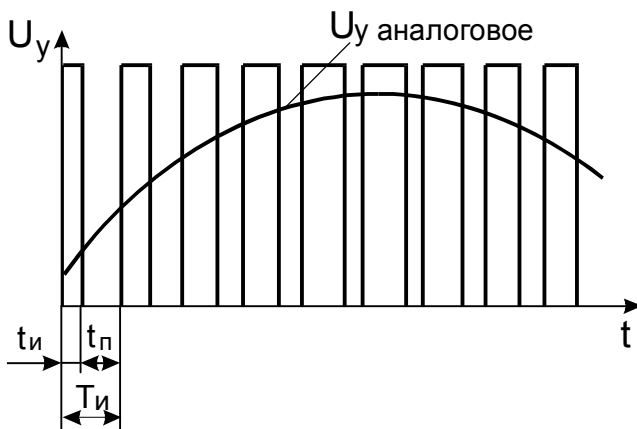


Рис.3.6. Преобразование аналогового сигнала в последовательность импульсов

скорости ротора непрерывно колеблется в определенных пределах. Амплитуда колебаний тем меньше, чем больше отношение электромеханической постоянной времени двигателя к периоду следования импульсов. Чтобы угловая скорость ротора однозначно определялась относительной продолжительностью импульсов, в период паузы t_n ротор должен тормозиться. Обычно для этой

цели достаточно механического торможения, вызванного наличием момента сопротивления на валу двигателя.

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики исполнительного двигателя постоянного тока при импульсном управлении с торможением за счет статического момента сопротивления M_{CT} на валу.

В зависимости от соотношения электромагнитной постоянной времени обмотки якоря $\tau_{эм}$ и значения T_{II} схемы управления, значений нагрузки и тока в цепи якоря, возможны два основных режима работы двигателя при импульсном управлении: режим прерывного тока и режим непрерывного тока.

Режим непрерывного тока возможен при $T_{II} \ll \tau_{эм}$. Этот режим характеризуется тем, что во время паузы t_n ток якоря, уменьшаясь за счет э.д.с. самоиндукции в обмотке якоря, продолжает протекать через диод Д (обозначен пунктиром на рис. 3.5,г) в том же направлении, что и во время паузы. При малой амплитуде колебаний мгновенной угловой скорости ток якоря и момент изменяются незначительно относительно средних значений. Среднее за период значение напряжения управления

$$U_{y\text{ ср}} = U_{y\text{ ном}} \cdot t_{и} / T_{II} = \tau_{и} \cdot U_{y\text{ ном}}.$$

Понимая под $U_y = U_{y\text{ ср}}$ и $M = M_{ср}$, можно получить уравнение механической характеристики

$$v_{ср} = \tau_{и} \cdot m_{ср}. \quad (3.8)$$

Механическая и регулировочная характеристики имеют такой же вид, как и при непрерывном якорном управлении с заменой α на $\tau_{и}$. Эти характеристики в режиме непрерывного тока линейны.

Режим прерывистого тока возможен при $\tau_{эм} < T_{II}$ и характеризуется тем, что в течение основного времени паузы t_n ток в якоря равен нулю.

Считая амплитуду колебаний мгновенной угловой скорости малой и

пренебрегая изменением тока якоря и вращающего момента двигателя в интервале t_u , легко получить уравнение

$$v_{cp} = 1 - m_{cp}/\tau_{и} \quad (3.9)$$

Это уравнение при $\tau_{и} = \text{const}$ представляет собой уравнение механической характеристики, а при $m_{cp} = \text{const}$ – уравнение регулировочной характеристики.

Из анализа уравнения (3.9) следует:

1. Механические характеристики (рис. 3.7,а) линейны и начинаются из одной общей точки холостого хода ($v_{cp} = 1, m_{cp} = 0$). Жесткость механических характеристик уменьшается при уменьшении $\tau_{и}$.

2. Регулировочные характеристики (рис. 3.7,б) нелинейны. Регулирование возможно только при $m_{cp} \neq 0$, так как при $m_{cp} = 0$ установившееся значение средней угловой скорости $v_{cp} = 1$ при любом $\tau_{и}$.

3. Условием пуска двигателя ($v_{cp} > 0$) является неравенство $\tau_{и} > m_{cp}$.

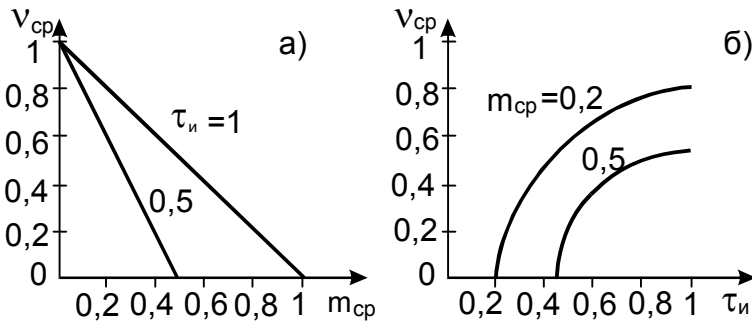


Рис. 3.7. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики в режиме прерывистого тока

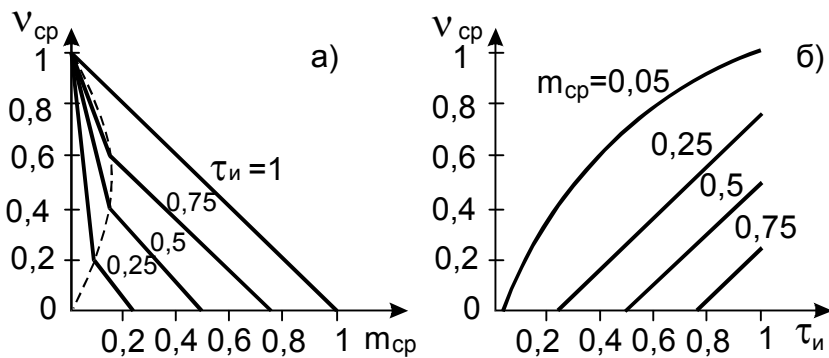


Рис. 3.8. Реальные механические (а) и регулировочные (б) характеристики при импульсном управлении

возможность создания электрических помех является достоинством линейных усилителей. Однако при этом на транзисторах выходного каскада такого усилителя рассеивается в виде тепла значительная мощность и для отвода тепла с целью защиты транзисторов от теплового разрушения необходимы тепло radiаторы достаточно больших размеров.

Усилитель с широтно-импульсной модуляцией имеет существенно

В реальных схемах импульсного управления режим работы двигателя в одном диапазоне моментов и угловых скоростей ближе к режиму непрерывного тока, в другом – к режиму прерывистого тока. Механические и регулировочные характеристики для

этого случая представлены на рис. 3.8,а,б. Граница перехода из одного режима в другой показана на рис. 3.8,а пунктирной линией.

Сопоставляя аналоговое и импульсное управление, можно сказать, что простота электрической схемы и не-

меньшие потери в транзисторах и более высокий коэффициент полезного действия. Транзисторы широтно-импульсного усилителя работают в режиме переключения, то есть положение рабочей точки транзистора поочередно находится или в области насыщения, или в области отсечки. Если транзистор находится в состоянии насыщения или в полностью включенном состоянии, то падение напряжения на коллекторно-эмиттерном переходе транзистора приблизительно равно 1 вольту и меньше, что соответствует малой мощности рассеивания транзистора. Если транзистор находится в состоянии отсечки или в полностью выключенном состоянии, когда ток коллектора практически равен нулю, то мощностью потерь транзистора можно пренебречь.

3.1.3. Использование тахогенератора для регулирования скорости вращения

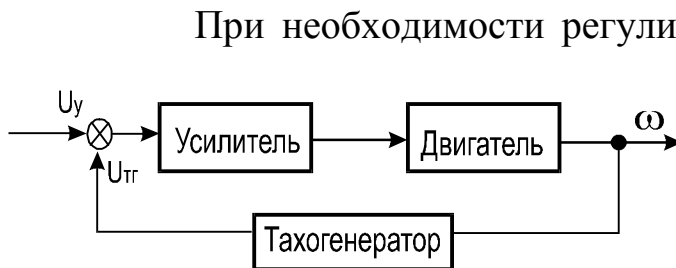


Рис. 3.9. Функциональная схема регулятора скорости вращения с использованием тахогенератора

При необходимости регулирования скорости вращения в широком диапазоне в регуляторе применяют обратную связь с использованием тахогенератора в качестве датчика скорости вращения двигателя. На рис. 3.9 показан пример построения функциональной схемы для такого случая.

На устройство сравнения поступает напряжение управления U_y и выходное напряжение тахогенератора $U_{ТГ}$, равное

$$U_{ТГ} = k_{m2} \cdot \omega, \quad (3.10)$$

где k_{m2} – крутизна характеристики тахогенератора.

Напряжение на входе усилителя равно $U_y - U_{ТГ}$, а на выходе усилителя – $k_y(U_y - U_{ТГ})$, где k_y – коэффициент усиления усилителя, которое является напряжением питания двигателя. По якорной обмотке при этом протекает ток

$$I_{я} = \frac{k_y(U_y - k_{m2}\omega) - C_E\omega}{R_{я}}.$$

Поскольку электромагнитный момент двигателя, равный току якоря, умноженному на C_M , уравнивается моментом нагрузки M_H , то можно записать

$$k_y(U_y - k_{m2}\omega) - C_E\omega = R_{я}M_H / C_M \quad \text{или} \\ \omega = \frac{k_y}{k_y k_{m2} + C_E} U_y - \frac{R_{я}M_H}{C_M(k_y k_{m2} + C_E)}. \quad (3.11)$$

При бесконечно большом коэффициенте усиления усилителя скорость вращения двигателя определяется в соответствии с выражением:

$$\omega = U_y / k_{m2}. \quad (3.12)$$

Это означает, что скорость вращения определяется только управляющим напряжением и крутизной характеристики тахогенератора и не зависит от внешнего момента нагрузки.

При конечном коэффициенте усиления усилителя скорость двигателя зависит от нагрузки. Пусть момент нагрузки увеличился на ΔM_H , а управляющее напряжение поддерживается постоянным. Тогда приращение скорости вращения, найденное из уравнения (1.18),

$$\Delta\omega = -\frac{R_\gamma}{C_M(k_\gamma k_{m2} + C_E)} \cdot \Delta M_H,$$

а отношение

$$\left| \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right| = \frac{R_\gamma \cdot \Delta M_H}{C_M(k_\gamma k_{m2} + C_E)\omega_0}, \quad (3.13)$$

где ω_0 – номинальная скорость вращения двигателя.

Назовем последнее отношение коэффициентом регулирования скорости вращения.

Чем меньше скорость вращения ω , тем выше коэффициент регулирования в уравнении (3.13). Например, если для номинальной скорости вращения 2000 об/мин он равен 1%, то он же для скорости вращения 500 об/мин равен 4%.

Диапазон изменения скорости вращения двигателя для системы регулирования тахогенераторного типа составляет от 0,1 об/мин до нескольких тысяч оборотов в минуту, поэтому при ее использовании обычно возникает необходимость в использовании ряда мер повышения качества системы регулирования, особенно при низких скоростях вращения.

3.1.4. Бесколлекторные двигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока с механическим коммутатором имеют ряд весьма существенных недостатков, обусловленных наличием щеточно-коллекторного узла. Эти недостатки ограничивают область их применения. В настоящее время в схемах автоматики широкое применение находят двигатели постоянного тока не с механическим (щетка-коллектор), а с полупроводниковым коммутатором. Эти двигатели, обладая практически всеми положительными свойствами обычных двигателей постоянного тока, лишены их основного недостатка.

По отношению к обычному коллекторному двигателю постоянного тока бесколлекторные двигатели являются обращенной машиной, так как

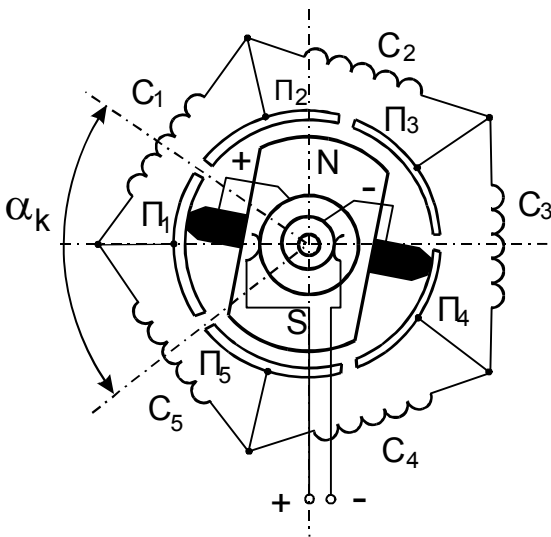


Рис. 3.10. Модель обращенного ДПТ

их якорная обмотка размещается на статоре, а индуктор, представляющий собой постоянный магнит, укрепляется на роторе. Для пояснения принципа действия электронного коммутатора коллекторного устройства рассмотрим модель обращенного двигателя с возбуждением от постоянного магнита (рис. 3.10). Неподвижная якорная обмотка (в данном случае пятисекционная) с системой коллекторных пластин расположена на статоре. Индуктор (двухполюсный магнит) с воображаемыми щетками по его нейтрали укреплен на вращающемся роторе; на нем же расположены два контактных кольца, через которые с помощью двух скользящих контактов подводится питание к щеткам. Очевидно, что, несмотря на обращенную конструкцию двигателя, принцип его действия полностью аналогичен коллекторному двигателю обычного типа с магнитоэлектрическим возбуждением. Функция коллектора заключается в последовательном круговом переключении положительного и отрицательного полюсов источника питания с одной вершины (узла) обмотки на соседнюю. При нечетном числе секций разноименные полюса переключаются поочередно со сдвигом, равным $\alpha_k/2$, где α_k – угол коммутации (четверть дугового размера коллекторной пластины), при четном – одновременно. Переключение пластин происходит при таком угловом положении ротора, когда угол между его вектором $\vec{\Phi}$ и вектором магнитодвижущей силы секции, заключенной между двумя коммутируемыми вершинами, а также электромагнитный момент, создаваемый этой секцией, и наводимая в нем эдс вращения равны нулю.

Схема бесконтактной (бесщеточной) коммутации секций обмотки бесколлекторного двигателя постоянного тока (БДПТ) должна содержать по два силовых бесконтактных ключа на каждую вершину и устройство управления для последовательного переключения ключевых элементов. Сигналы на схему управления должны подаваться от бесконтактного измерителя углового положения (так называемого датчика положения ротора) оси индуктора относительно осей каждой секции обмотки.

На рис. 3.11 приведена упрощенная схема БДПТ-аналога коллекторного двигателя постоянного тока, изображенного на рис. 3.10. БДПТ содержит собственно двигатель (Дв), датчик положения ротора (ДПР) и коммутатор, в данном случае состоящий из пяти пар транзисторных ключей $T_1T_1' \dots T_5T_5'$. ДПР состоит из обоймы чувствительных элементов $\mathcal{E}_1\mathcal{E}_1' \dots \mathcal{E}_5\mathcal{E}_5'$ на статоре и дополнительного индуктора, укрепленного на

роторе. В поперечном сечении индуктор ДПР имеет вид сектора с угловым размером, равным дуговому размеру коллекторных пластин. Индуктор ДПР ориентирован в пространстве так, что его геометрическая ось (биссектриса угла между радиусами сектора) перпендикулярна оси основного индуктора.

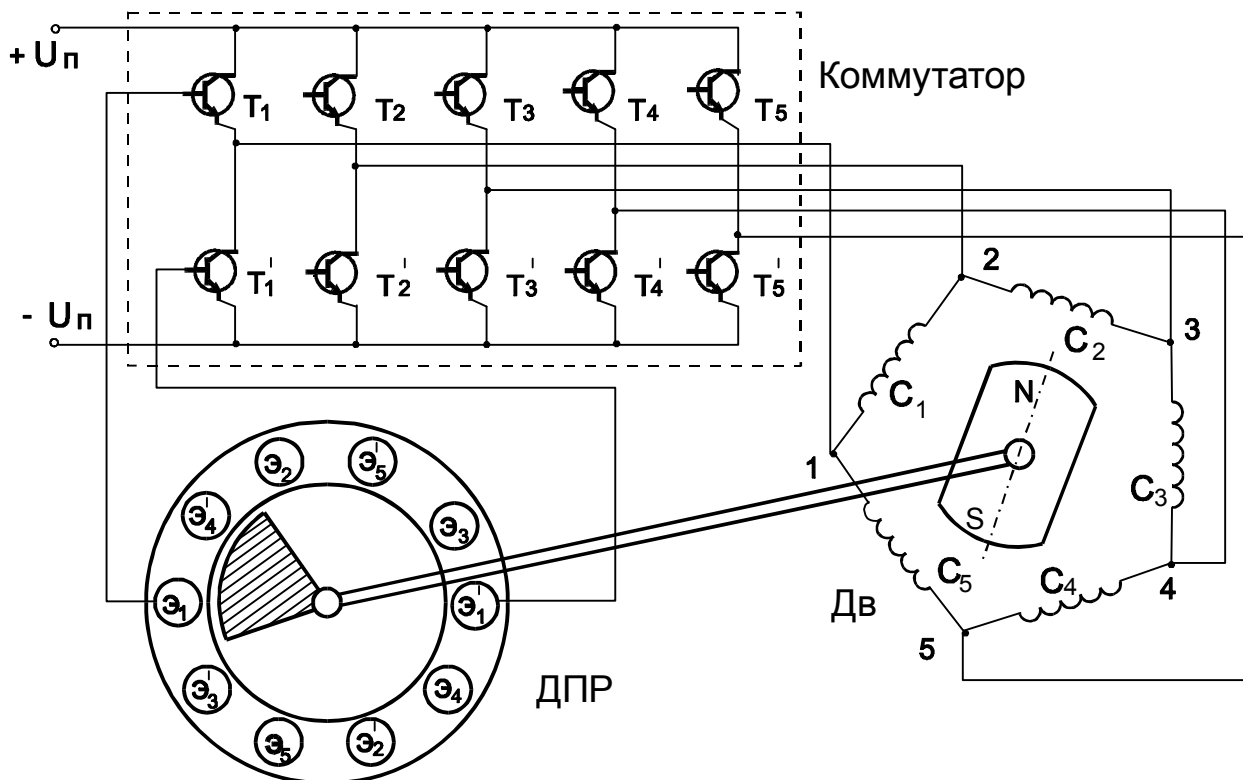


Рис.3.11. Упрощенная схема бесколлекторного ДПР

Пары диаметрально противоположных чувствительных элементов расположены в обойме относительно секций обмотки так, как были бы расположены коллекторные пластины. В положении ротора, изображенном на рис. 3.11 и аналогичном рис. 3.10, чувствительные элементы \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_4' находятся в возбужденном состоянии, ключи T_1 и T_4' замкнуты, вершина 1 обмотки подключена к положительной шине источника питания, вершина 4 – к отрицательной. Нетрудно убедиться, что при такой геометрии чувствительных элементов и индуктора коммутация вершин обмотки при вращении ротора полностью аналогична этому процессу в коллекторном двигателе.

Конструкция ДПР определяется типом его чувствительных элементов, в качестве которых в настоящее время применяются датчики э.д.с. Холла, магнитодиоды, магнитосопротивления, всевозможные датчики электромагнитного типа, фотодиоды, радиационные датчики и т.п. Датчики положения всегда располагаются в одном корпусе с двигателем. Выбор типа ДПР определяется конкретными требованиями к двигателю – устойчивостью к воздействию климатических и механических факторов, числом выводных концов, габаритами, стоимостью, технологичностью.

Сопоставление схем коллекторного двигателя и БДПТ показывает, что в них одинаковы схемы обмоток, ориентация коллекторных пластин и чувствительных элементов ДПР по отношению к осям секций, ориентация щеток и сектора индуктора ДПР по отношению к оси основного магнита, а также последовательность коммутации вершин замкнутой обмотки. Эти общие признаки позволяют при некоторых допущениях анализировать работу БДПТ методами, разработанными для коллекторных машин постоянного тока.

Специфичны для БДПТ следующие особенности, выделяющие их в отдельный класс электрических машин:

1. Коммутация силовых ключей происходит практически мгновенно. В этом случае коммутатор имитирует коллекторно-щеточный узел со щетками, в которых контактные поверхности дуговых размеров близки к нулю, а коллекторные пластины не имеют зазоров между собой. Вследствие этого при коммутации нет режимов короткого замыкания секций и разрыва тока.

2. Обмотки БДПТ содержат, как правило, малое число секций (2...4), поэтому необходимо считаться с влиянием пульсаций ЭДС вращения и электромагнитного момента на энергетические характеристики двигателя и точность системы, в которой он используется.

3. В БДПТ допускается большое разнообразие типов обмоток, отличающихся числом секций, схемой их соединения и способом коммутации, в то время как в коллекторных двигателях обычно применяется замкнутая обмотка из одной пары параллельных ветвей.

4. Наличие полупроводникового коммутатора, совмещающего и функции усилителя мощности, расширяет возможности построения разнообразных схем управления и регулирования скорости.

В реальных схемах коммутаторов для обеспечения нормальной работы датчика положения, усиления сигналов управления его чувствительных элементов, обеспечения четкой работы транзисторов коммутатора и т.п. используется большое число различных вспомогательных элементов и схем, которые значительно усложняют схему двигателя, увеличивают его размеры и стоимость.

Разработка схем регулирования скорости вращения БДПТ сопряжена с двумя особенностями этого двигателя. Во-первых, коммутация секций статорной обмотки осуществляется однонаправленными ключами и изменение полярности напряжения питания недопустимо, поэтому изменение направления вращения может быть задано только последовательностью (прямой или обратной) коммутации ключей. Во-вторых, использование в качестве силовых ключей коммутатора транзисторов позволяет совместить функции коммутатора и регулятора подводимой к двигателю электрической мощности.

Способы управления БДПТ, основанные на общих для двигателей постоянного тока принципах с учетом указанных особенностей, разделяются на линейные и широтно-импульсные, которые, в свою очередь, имеют достаточно много модификаций.

На рис. 3.12,а приведена блок-схема БДПТ с линейным управлением. Питание коммутатора осуществляется от нереверсивного линейного усилителя мощности.

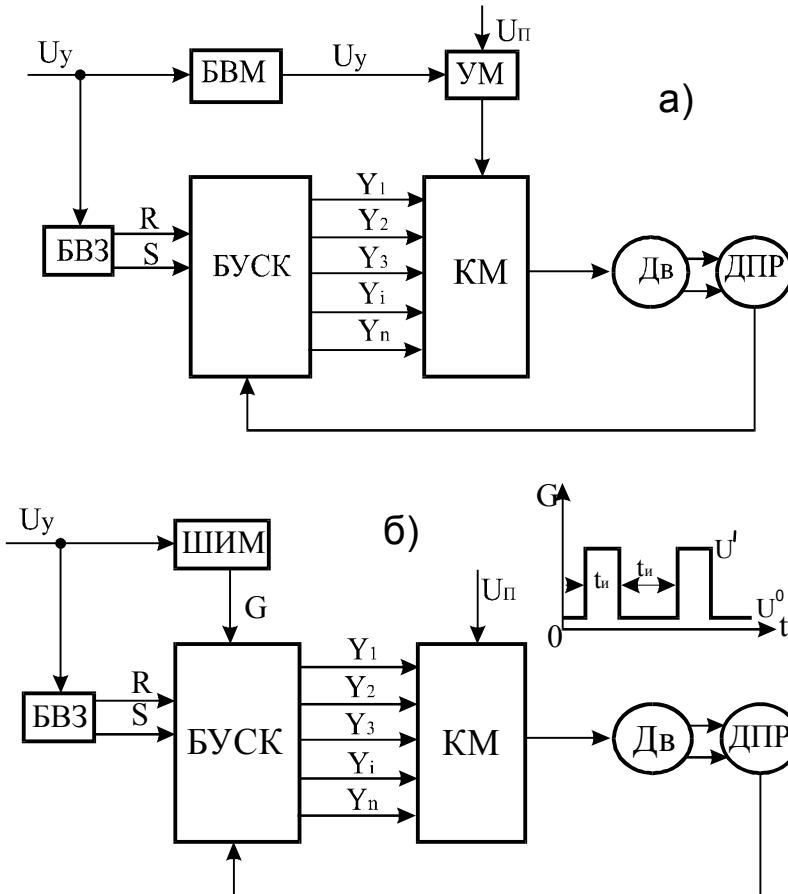


Рис.3.12. Функциональная схема БДПТ с линейным (а) и широтно-импульсным (б) управлением.

Блоки выделения знака (БВЗ) (компаратор) и выделения модуля (БВМ) (выпрямитель) выделяют из напряжения управления U_y соответственно знак и модуль. Знак напряжения управления в виде взаимоинверсных логических уровней сигналов R и S подается в блок управления силовыми ключами БУСК коммутатора КМ и совместно с сигналами ДПР определяет последовательность коммутации секций обмоток БДПТ, то есть направление вращения двигателя. Модуль сигнала управления в виде уровня напряжения постоянного тока поступает на вход усилителя мощности УМ и определяет абсолютную величину подводимой к коммутатору электрической мощности, причем полярность подводимого усиленного напряжения управления U_y всегда постоянна и не зависит от знака управляющего напряжения.

На рис. 3.12,б приведена блок-схема, иллюстрирующая широтно-импульсный способ управления БДПТ. Здесь питание коммутатора осуществляется от нерегулируемого источника постоянного напряжения $U_{п}$.

В отличие от схемы с линейным управлением выходные сигналы БУСК, определяющие состояние силовых транзисторов коммутатора, зависит не только от сигналов ДПР и БВЗ, но также и от модуля (амплитуды) входного напряжения. В БУСК предусмотрен дополнительный вход для сигнала G с выхода широтно-импульсного модулятора (ШИМ), кото-

рый выделяет модуль входного напряжения управления и преобразует его в импульсную форму. Сигнал G представляет собой чередование с периодом T_{II} , много меньшим периода коммутации, интервалов высокого и низкого уровня U' и U^0 .

В течение действия одного из уровней t_u (рабочего импульса) сигналы с выхода ДПР, модулированные сигналами с БВЗ, поступают на управляющие входы коммутатора, и силовые ключи отпираются в соответствии с положением ротора и знака напряжения управления.

В течение действия t_n другого уровня сигнала G (паузы) сигналы $Y_1 \dots Y_n$ на выходе БУСК изменяются так, что поступление электрической мощности от источника питания к двигателю в прямом направлении прекращается и вращающий момент двигателя уменьшается.

Широтно-импульсное управление, как и в случае импульсного управления коллекторным двигателем, заключается в изменении относительной длительности рабочего импульса пропорционально напряжению управления, то есть

$$\tau_u = \frac{U_y}{U_{уном}} = \frac{t_u}{T_{II}},$$

где τ_u – относительная длительность импульса (коэффициент импульсного сигнала управления); t_u – длительность рабочего импульса; T_{II} – период модуляции.

При линейном управлении БДПТ по напряжению уравнение механических и регулировочных характеристик имеет вид (3.16), то есть эти характеристики линейны и параллельны (рис. 3.13).

В зависимости от логической функции, выполняемой БУСК, возможны четыре состояния силовых ключей в

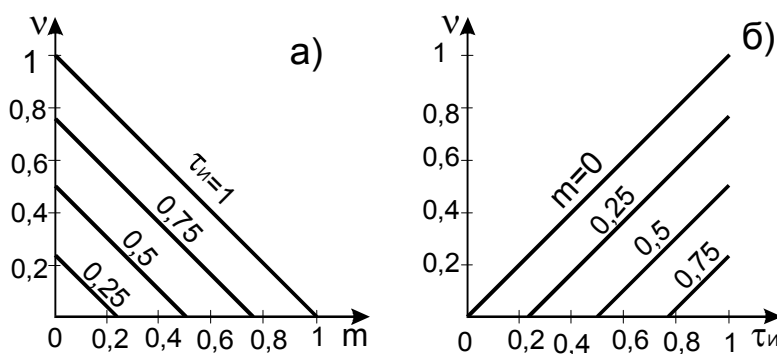


Рис.3.13. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики БДПТ при линейном управлении по напряжению.

возможны четыре состояния силовых ключей в паузе, характеризующие четыре способа широтно-импульсного управления БДПТ. Все эти методы имеют свои достоинства и недостатки.

Наиболее просты в реализации коммутаторы, обеспечивающие бестормозной режим работы БДПТ с рекуперацией (возвратом) энергии в источник питания. Однако регулировочные характеристики двигателя при этом нелинейны, а механические характеристики имеют малую жесткость при малых нагрузках на валу. Это может потребовать специального оборудования для торможения системы при от-

ключении управляющего сигнала.

Регулировочные характеристики двигателя при использовании нерекуперативного режима управления без электромагнитного торможения менее нелинейны, чем в предыдущем случае.

БДПТ с динамическим торможением и торможением противотоком имеют линейные механические и регулировочные характеристики, такие же, как при линейном управлении (см. рис. 3.13).

Следует отметить также, что при поочередной коммутации токов в секциях обмотки происходит скачкообразное перемещение магнитного поля в зазоре машины. Момент, развиваемый двигателем, не остается постоянным в пределах одного оборота вала. Вследствие этого двигатели, использующие дискретные преобразователи, не позволяют обеспечить высокую стабильность мгновенной скорости вращения. БДПТ с аналоговыми преобразователями этого недостатка не имеют.

В дискретных устройствах мощности, рассеиваемые элементами схем логической обработки сигнала, для всех типов усилителей-коммутаторов невелики и составляют доли ватта. Поэтому при изготовлении этих устройств применимы обычные способы миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры.

Проблема миниатюризации усилителей мощности более сложна. Выходные мощности на валу приборных следящих систем обычно составляют 1...100 Вт и, следовательно, с учетом коэффициента полезного действия двигателя, выходные энергетические мощности усилителя заключаются в пределах 3...200 Вт. Например, при использовании усилителя класса В с выходной мощностью 3 Вт, рассеиваемая мощность на силовых транзисторах составляет примерно 1 Вт. Площадь теплоотводящей поверхности при этом не превышает 50...60 см². Если же усилитель класса В имеет мощность порядка 200 Вт, то поверхность теплоотвода должна составлять 2500...3000 см² и миниатюризация усилителя невозможна. Поэтому целесообразно, с точки зрения миниатюризации усилителей мощности более 3 Вт, использовать ключевые режимы, так как только в этом случае можно эффективно уменьшить мощность, рассеиваемую непосредственно на усилителе и, следовательно, площадь теплоотводящей поверхности. При этом необходимо учитывать изменение механических и регулировочных характеристик двигателей.

3.1.5. Переходные процессы в двигателях постоянного тока

В предыдущих разделах рассматривались статические характеристики исполнительных двигателей постоянного тока. Настоящий раздел посвящен анализу динамических характеристик.

Одним из основных требований, предъявляемых к исполнительному

двигателю, является его высокое быстродействие, под которым понимают время от момента подачи сигнала в обмотку управления до момента достижения ротором заданной скорости вращения. Строго говоря, быстродействие двигателя определяется скоростью протекания, во-первых, механических процессов, во-вторых, электромагнитных процессов, которые имеют место после включения обмотки управления под напряжение. При этом различают электромеханическую и электромагнитную постоянные времени, характеризующие протекание соответствующих процессов.

Для анализа динамических характеристик удобно представлять двигатель эквивалентной схемой замещения. Важнейшим фактором, влияющим на динамические характеристики, является момент инерции ротора, который в эквивалентной схеме замещения можно представить емкостью. При этом кинетическая энергия $J_{ДВ}\omega^2/2$, зависящая от момента инерции ротора, заменяется электростатической энергией $e^2/2C$, где $C=J_{ДВ}/C_{ДВ}^2$, $J_{ДВ}$ – момент инерции ротора; $C_{ДВ}$ – постоянная двигателя (напомним, что $C_{ДВ}=C_E=C_M$ в системе единиц СИ).

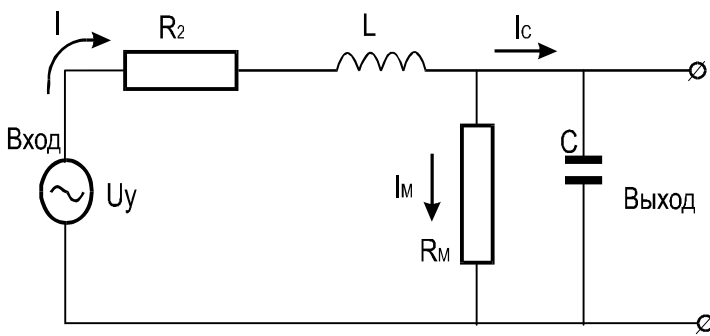


Рис. 3.14. Эквивалентная схема замещения ДПТ

Нагрев, обусловленный моментом трения на валу двигателя, заменяется в схеме замещения джоулевыми потерями в резисторе $R_m=C_{ДВ}^2/M_{тр}$.

Эквивалентная схема замещения двигателя постоянного тока представлена на рис 3.14.

Момент, развиваемый двигателем в переходном режиме, затрачивается на преодоление момента от сил инерции $J_{ДВ} \cdot d\omega / dt$ и на преодоление статического момента на валу $M_{СТ}$ (в том числе трения):

$$M_{ДВ} = J_{ДВ} \cdot d\omega / dt + M_{СТ}.$$

Отсюда можно получить

$$I = \frac{1}{C_{ДВ}} \left(J_{ДВ} \frac{d\omega}{dt} + M_{СТ} \omega \right) = I_C + I_M.$$

Поскольку скорость вращения $\omega(t)$ и противоэдс $e(t)$ связаны между собой выражением $e(t) = C_{ДВ} \cdot \omega(t)$, то последнее выражение можно записать в виде

$$I = \frac{J_{ДВ}}{C_{ДВ}^2} \frac{de(t)}{dt} + \frac{M_{СТ}}{C_{ДВ}^2} e(t) = I_C + I_M.$$

Переходные процессы в двигателях исследуются при статическом моменте на валу $M_{СТ}=0$.

Уравнение баланса напряжений в этом случае для схемы, изображенной на рис. 3.14, можно записать в виде

$$U_Y(t) = L_{Я} \frac{dI}{dt} + R_{Я} I + \frac{1}{C} \int_0^t I dt. \quad (3.14)$$

Применив преобразование Лапласа к правой и левой частям выражения (3.14), получим

$$U_Y(p) = pL_{Я}I(p) + R_{Я}I(p) + \frac{1}{pC} I(p) = \left(pL_{Я} + R_{Я} + \frac{1}{pC} \right) I(p),$$

где $U_Y(p)$ -лапласово изображение функции $U_Y(t)$; $I(p)$ -лапласово изображение функции $I(t)$.

Из последнего уравнения можно получить

$$\frac{U_Y(p)}{I(p)} = pL_{Я} + R_{Я} + \frac{1}{pC}.$$

Для нахождения связи между входным напряжением U_Y и напряжением на конденсаторе U_C с использованием преобразования Лапласа $U_C(p)$ должно быть выражено в виде емкостного сопротивления, умноженного на выходное напряжения, то есть

$$U_C(p) = \frac{1/p \cdot C}{pL_{Я} + R_{Я} + 1/p \cdot C} U_Y(p).$$

Теперь можно найти передаточную функцию двигателя

$$W(p) = \omega(p)/U_Y(p) = \frac{U_C(p)}{U_Y(p)} \cdot \frac{1}{C_{ДВ}} = \frac{(C_{ДВ}^2 / p \cdot J_{ДВ}) \cdot (1/C_{ДВ})}{R_{Я} + pL_{Я} + C_{ДВ}^2 / (pJ_{ДВ})} = \frac{C_{ДВ}}{p^2 L_{Я} J_{ДВ} + pR_{Я} J_{ДВ} + C_{ДВ}^2}.$$

Или

$$W(p) = \frac{1/C_{ДВ}}{T_{\Pi}^2 p^2 + 2\xi T_{\Pi} p + 1}, \quad (3.15)$$

где введены обозначения

$$T_{\Pi} = \sqrt{\tau_m \tau_{эм}};$$

$$\xi = 1/2 \cdot \sqrt{\tau_m / \tau_{эм}} - \text{коэффициент затухания}; \quad (3.16)$$

$$\tau_{эм} = L_{Я}/R_{Я} - \text{электромагнитная постоянная времени}; \quad (3.17)$$

$$\tau_m = J_{ДВ} R_{Я} / C_{ДВ}^2 = J_{Р} \omega_{хх} / M_K = J_{ДВ} / F \quad (3.18) - \text{электрохимическая постоянная времени};$$

янная времени;

$\omega_{хх}$ – скорость холостого хода;

M_K – момент короткого замыкания (пусковой момент);

$F = M_K / \omega_{хх}$ – коэффициент внутреннего демпфирования, определяющий крутизну механической характеристики.

Электрохимическая постоянная времени двигателя при якорном

управлении не зависит от коэффициента сигнала, что следует из параллельности механических характеристик при различных коэффициентах сигнала.

Передаточная функция отражает процессы изменения тока в якоре (электромагнитный процесс) и скорости вращения ротора (механический процесс). Если коэффициент затухания $\xi < 1$, то переходной процесс имеет колебательный характер, а если $\xi > 1$ ($\tau_M > 4\tau_{эм}$), то переходный процесс носит апериодический характер. В последнем случае передаточная функция (3.15) может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$W(p) = \frac{1/C_{ДВ}}{(\tau_{эм}p + 1)(\tau_M p + 1)}. \quad (3.19)$$

Уравнение (3.19) можно пояснить с помощью рис. 3.15. При приложении к двигателю, например, скачка напряжения изменение тока якоря

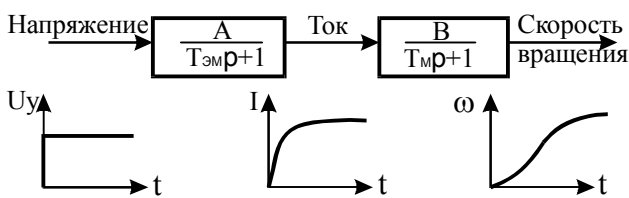


Рис. 3.15. Иллюстрация уравнения (3.19).

происходит с запаздыванием, пропорциональным электромагнитной постоянной времени $\tau_{эм}$. В ответ на изменение тока якоря происходит запаздывание роста скорости вращения ротора, пропорциональное электромеханической постоянной

времени τ_M .

Если между постоянными времени имеет место соотношение

$$\tau_M \gg \tau_{эм}, \quad (3.20)$$

то из передаточной функции (3.19) получаем

$$W(p) = \frac{1/C_{ДВ}}{\tau_M p + 1}. \quad (3.21)$$

На практике условие (3.20) для коллекторных двигателей постоянного тока с якорным управлением выполняется практически всегда, поэтому для них используют передаточную функцию в виде (3.21). Для бесколлекторных двигателей постоянного тока в некоторых случаях из-за большой индуктивности обмоток величины электромагнитной и электромеханической постоянных времени могут быть сопоставимы. В этом случае необходимо пользоваться передаточной функцией (3.19).

Если под выходной величиной двигателя понимать угол поворота его выходного вала φ , то, учитывая, что $\omega = d\varphi/dt$, передаточная функция в этом случае имеет вид

$$W_\varphi(p) = \frac{1/C_{ДВ}}{p(T_{II} p^2 + 2\xi T_{II} p + 1)} \quad (3.22)$$

или при $\tau_M \gg \tau_{эм}$

$$W_{\varphi}(p) = \frac{1/C_{ДВ}}{p(\tau_{ЭМ}p + 1)}. \quad (3.23)$$

В последнем случае двигатель может быть представлен структурной схемой, состоящей из трех последовательно соединенных звеньев:

- а) усилительного звена с коэффициентом усиления $k_{об} = 1/C_{ДВ}$;
- б) интегрирующего звена с передаточной функцией $1/p$;
- в) апериодического звена с передаточной функцией $1/(\tau_M p + 1)$.

Если необходимо рассчитать изменение скорости вращения $\omega(t)$ в функции времени, то из выражения (3.21) можно получить

$$\omega(t) = \frac{U_Y}{C_{ДВ}} (1 - e^{-t/\tau_M}). \quad (3.24)$$

В ответ на изменяющееся управляющее воздействие происходит запаздывание роста скорости вращения, что иллюстрируется рис.3.16. Двигатель набирает значение скорости вращения в 0,633 от установившейся за время τ_M .

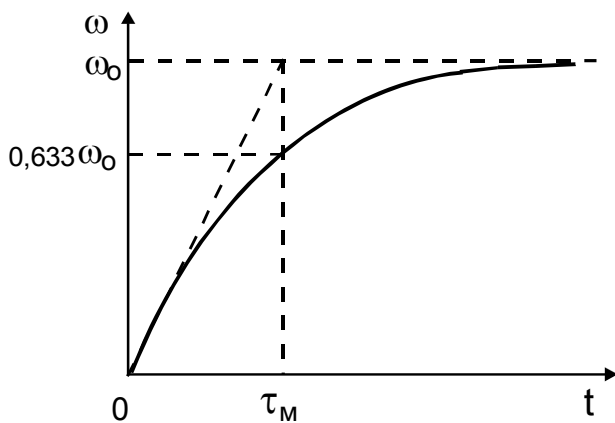


Рис.3.16. Переходной процесс по скорости

Двигатель набирает значение скорости вращения в 0,633 от установившейся за время τ_M .

К величине электромеханической постоянной времени в исполнительных двигателях предъявляются весьма жесткие требования. Величина ее, как следует из выражения (3.18), определяется конструктивными параметрами двигателя.

При питании двигателя от усилителя в переходном процессе напряжение на выходе усилителя уменьшается из-за падения напряжения в его выходном каскаде от пусковых токов двигателя. Поэтому постоянную времени двигателя следует увеличивать при расчетах в отношении $(R_{Я} + R_{ВЫХ})/R_{Я}$, где $R_{ВЫХ}$ — выходное сопротивление усилителя, которое должно выбираться таким, чтобы выполнялось условие максимальной отдачи им мощности. Очевидно, что это условие будет вместе с тем условием получения наименьшей электромеханической постоянной времени при работе двигателя от усилителя.

3.2. Исполнительные двигатели переменного тока

В качестве исполнительных двигателей переменного тока наибольшее распространение получили двухфазные асинхронные исполнительные двигатели и шаговые двигатели — исполнительные синхронные.

3.2.1 Двухфазные асинхронные исполнительные двигатели

К положительным качествам этих двигателей относят:

- малую величину сигнала трогания;
- сравнительно неплохую линейность механических и регулировочных характеристик при работе в ограниченном диапазоне скоростей; при этом у большинства двигателей нелинейность лежит в пределах от 0,05 до 0,15, что обеспечивает устойчивую работу двигателя при всех рабочих частотах вращения и кратность регулирования скорости $\omega_{max}/\omega_{min}=100...200$;
- достаточно высокое быстродействие. Электромеханическая постоянная времени подавляющего большинства современных двигателей не превышает 0,06с даже у двигателей на 400...500Гц с большими скоростями вращения;
- простоту конструкции, отсутствие скользящих контактов, высокую надежность.
- плавность и бесшумность хода.

К недостаткам асинхронных исполнительных двигателей относят:

- низкий коэффициент полезного действия, даже в номинальном режиме не превосходящий 0,2...0,4 и значительно уменьшающийся при регулировании;
- низкий коэффициент мощности $\cos\varphi=0.2...0.4$;
- большие габариты и массу, обусловленные первыми двумя недостатками. По габаритам и массе асинхронные исполнительные двигатели в несколько раз больше исполнительных двигателей постоянного тока одной и той же номинальной мощности.

Желание уменьшить габариты и массу приводит к тому, что подавляющее большинство асинхронных исполнительных двигателей рассчитывается на работу от сетей с повышенной частотой (обычно 400Гц). При этом двигатель имеет повышенную скорость вращения и, следовательно, развивает ту же механическую мощность при меньших моментах на валу.

Классифицируя исполнительные асинхронные двигатели по конструкции ротора, можно указать, как на наиболее распространённые, двигатели с короткозамкнутыми роторами типа "беличья клетка" (рис. 1.8,а) и с полым немагнитным (обычно алюминиевым) ротором (рис. 1.8,б). Двигатели с ферромагнитным омедненным и с ферромагнитным роторами находят очень ограниченное применение.

Характерной особенностью двигателя с полым немагнитным ротором является значительный ток холостого хода, составляющий до 0,85...0,95 от номинального. Это объясняется тем, что в этих двигателях величина немагнитного зазора весьма велика.

Способы управления и характеристики исполнительных двухфазных асинхронных двигателей

Среди асинхронных двигателей в качестве исполнительных, как правило, используются двухфазные двигатели с повышенным активным сопротивлением ротора, прежде всего из-за сравнительной простоты схемы их управления. Иногда в качестве исполнительных, когда требуется создание больших моментов, используются трехфазные двигатели.

Практически все способы управления исполнительными асинхронными двигателями связаны с деформацией вращающегося магнитного поля в машине, то есть наложение на поле прямой последовательности тормозного поля. Это является основной причиной неэкономичности применяемых способов управления.

Конструктивно двухфазный исполнительный асинхронный двигатель содержит статор с двумя взаимно перпендикулярными обмотками ОВ и ОУ и короткозамкнутый ротор в виде "беличьей клетки" или полого немагнитного стакана.

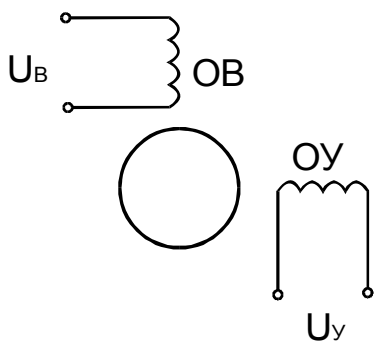


Рис.3.17. Электрическая схема двухфазного АИД

Его электрическая схема показана на рис 3.17. Обмотка возбуждения ОВ непосредственно подключена к сети переменного тока, на обмотку управления ОУ подается управляющий сигнал. Обмотку управления для упрощения согласования выходного каскада усилителя и двигателя часто

выполняют в виде двух отдельных одинаковых частей.

В настоящее время для двухфазных исполнительных асинхронных двигателей в большинстве случаев используют два способа управления: амплитудный и фазовый. При первом способе напряжение U_y , подаваемое

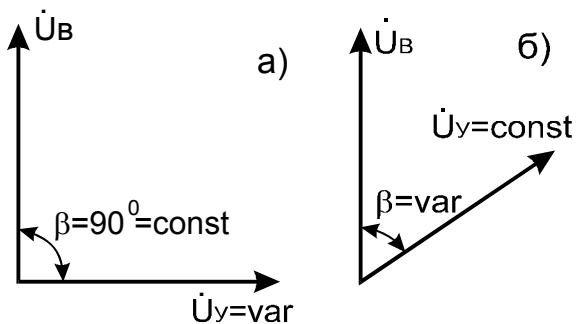


Рис.3.18. К пояснению способов управления двухфазным асинхронным двигателем

в ОУ, сдвинуто по фазе постоянно по отношению к напряжению возбуждения на четверть периода ($\beta = 90^\circ$), а выходные параметры двигателя определяет амплитуда напряжения управления (рис 3.18,а). При фазовом способе управления на обмотку управления подается постоянное по амплитуде напряжение, которое в процессе регулирования изменяется по фазе (рис. 3.18,б). То есть амплитудное управление

выходными параметрами двигателя связано с нарушением первого условия получения кругового вращающегося магнитного поля в выражении (1.22), а фазовое - с нарушением второго условия в выражении (1.22).

Под коэффициентом сигнала (величиной напряжения управления в

относительных единицах) при амплитудном управлении понимают отношение:

$$\alpha = (U_Y / U_B) \cdot k, \quad (3.25)$$

где $k = w_B / w_Y$ – коэффициент трансформации.

При фазовом управлении за коэффициент сигнала принимается

$$\alpha = \sin \beta. \quad (3.26)$$

Круговое вращающееся поле при амплитудном управлении независимо от режима работы двигателя имеет место при $\alpha = 1$. При всех других значениях α поле эллиптическое; при $\alpha = 0$ – пульсирующее.

Одним из главных требований, предъявляемых к исполнительным двигателям, заключается в том, что при снятии сигнала управления ($\alpha = 0$) ротор должен остановиться без применения каких-либо тормозящих устройств, то есть должен отсутствовать самоход.

При снятии сигнала управления в двухфазном исполнительном двигателе его работа становится полностью аналогичной работе силового однофазного двигателя (см. главу 2). Последний при этом не останавливается

и находится в состоянии вращающегося ротора, так как в нем отсутствует тормозной момент (при критическом скольжении $s_{кр} < 1$). То есть двухфазный асинхронный двигатель, имеющий такие же характеристики, как однофазный силовой, не может быть использован как исполнительный. Необходимо так изменить эти параметры, чтобы при снятии сигнала управления, то есть при переходе исполнительного двигателя в однофазный режим, момент двигателя был бы тормозным.

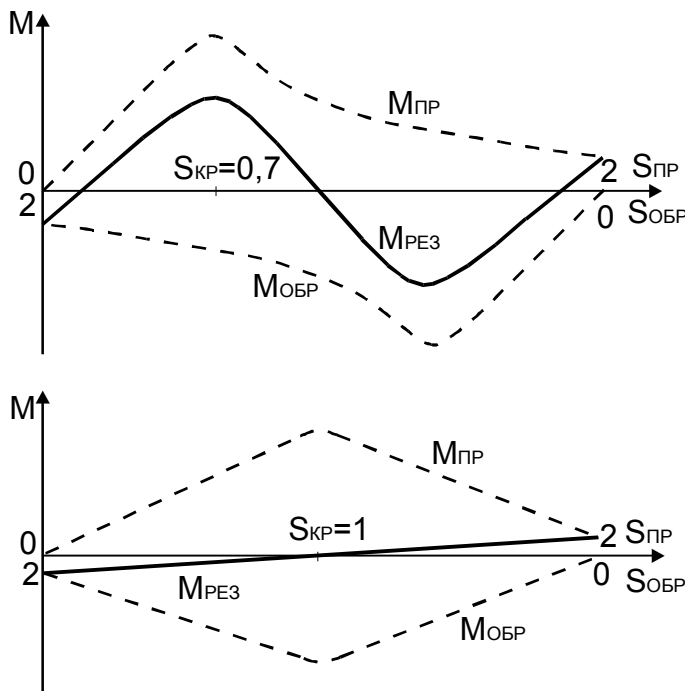


Рис. 3.19. Механические характеристики при пульсирующем поле

двигателя при различных критических скольжениях (рис. 3.19) замечаем, что развиваемый им момент (соответственно и момент, развиваемый двухфазным двигателем при отсутствии сигнала управления) становится отрицательным (тормозным), когда двигатель имеет $s_{кр} \geq 1$.

Таким образом, условием отсутствия самохода в двухфазном асинхронном двигателе является значение $s_{кр} \geq 1$. При этом также улучшается (повышается линейность), с точки зрения управляемости, механическая

Построив механические характеристики однофазного

характеристика при круговом вращающемся магнитном поле. Следствием увеличения критического скольжения является уменьшение коэффициента полезного действия двигателя.

Помимо самохода, вызванного недостаточной величиной критического скольжения, может возникнуть самоход иного рода – так называемый технологический, вызванный погрешностью технологии изготовления. В реальных двигателях для гарантированного устранения самохода выбирают $s_{кр} = 2 \dots 4$. В двигателях с полым немагнитным ротором требуемое значение $s_{кр}$ достигается за счет достаточно большого его активного и очень малого индуктивного сопротивления. В двигателях с ротором типа "беличья клетка" большого активного сопротивления роторных обмоток достигают путем подбора материала обмоток.

Рассмотрим характеристики двигателя при различных способах управления.

Амплитудное управление.

При анализе свойств исполнительных двигателей с целью существенного упрощения чаще всего пользуются понятием идеализированного двигателя, когда пренебрегают всеми сопротивлениями, кроме активного сопротивления ротора. Основанием для такой идеализации служит то обстоятельство, что ротор асинхронных исполнительных двигателей для устранения самохода делают с повышенным активным сопротивлением.

Также как и для исполнительных двигателей постоянного тока, для двухфазных двигателей характеристики строят также в относительных единицах. Приняв в качестве единичного момента $M_{к0}$ момент при пуске ($n_2=0$) в круговом вращающемся поле ($\alpha = 1$), а в качестве единицы скорости – синхронную скорость $n_1 = 60f/p$, можно для идеализированного двигателя записать выражение относительного момента

$$m = \frac{M}{M_{к0}} = \alpha - 0.5v(1 + \alpha) \quad (3.27)$$

где $v = n_2 / n_1$ – относительная скорость вращения ротора; α – определяется выражением (3.25).

По формуле (3.27) на рис. (3.20,а) построены механические характеристики идеализированного двигателя при амплитудном управлении независимо от его индивидуальных свойств, абсолютного значения момента, частоты вращения и т.д.

При неизменном коэффициенте сигнала управления $\alpha(U_Y)$ зависимость момента от скорости $m = m(v)$ является линейной. Относительный момент сил трогания численно равен коэффициенту сигнала. Переходя к абсолютными значениями момента, можно записать, что $M_{ПУСК} = C_M U_Y$, где C_M – коэффициент момента двигателя. С изменением α изменяется и наклон механической характеристики, что является недостатком рассмат-

риваемого способа регулирования.

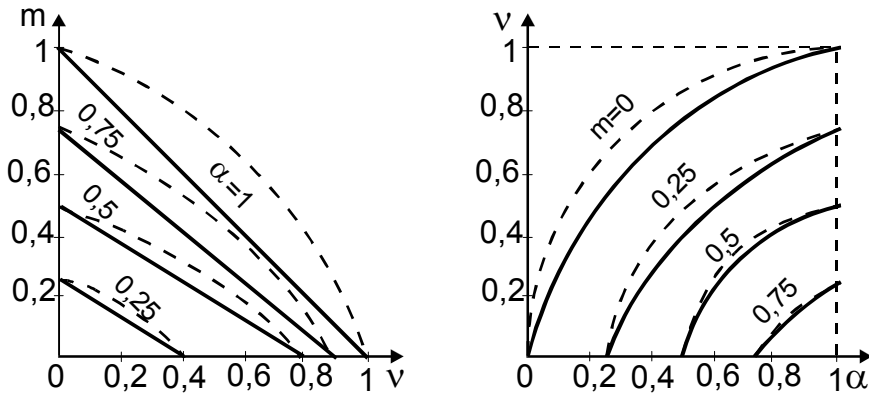


Рис.3.20. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики двигателя с амплитудным управлением

Регулировочные характеристики $v = v(\alpha)$ (рис. 3.20,б) получаются из выражения (3.27) при решении его относительно v :

$$v = 2(\alpha - m)/(1 + \alpha^2). \quad (3.28)$$

Даже для идеализированного двигателя регулировочные характеристики являются при работе во всем диапазоне скоростей существенно нелинейными, что может вызвать затруднения при проектировании и требует применения ряда дополнительных элементов. Начальные точки кривых $v = v(\alpha)$, лежащие на оси абсцисс, характеризуют чувствительность двигателя. Минимальное напряжение, при котором ротор начинает вращаться, преодолевая заданный тормозящий момент, называют напряжением трогания.

Механическая характеристика реального двигателя нелинейна (пунктирная линия на рис. 3.20,а), а его регулировочная характеристика еще более нелинейна чем у идеального двигателя (пунктирные линия на рис. 3.20,б).

Для повышения точности системы, в которой используется двигатель, желательно обеспечить линейность его регулировочных и механических характеристик. Частично этого можно добиться, увеличивая активное сопротивление ротора; однако при этом ухудшается использование двигателя, уменьшение его коэффициента полезного действия и абсолютной величины вращающего момента. Только при малых значениях α регулировочную характеристику двигателя с амплитудным управлением можно считать линейной, положив приближенно:

$$v' = 2(\alpha - m). \quad (3.29)$$

При этом мерой погрешности в линейности регулировочной характеристики может служить величина

$$\Delta v = 2(\alpha - m) - v. \quad (3.30)$$

На практике обычно считают, что линейность регулировочных ха-

Частоту вращения при холостом ходе можно получить из (3.27) при $m=0$:

$$v = 2\alpha/(1 + \alpha^2).$$

Снижение частоты вращения в режиме холостого хода при меньших значениях α объясняется тормозящим действием обратного поля.

рактических характеристик достаточно при изменении коэффициента сигнала от 0 до 0,5.

В этом случае можно для скорости холостого хода записать

$$n_{xx} = C_{\omega} U_y,$$

где $C_{\omega} = 2\omega_0 / p U_B$ - коэффициент скорости.

Практически при проектировании следящего привода следует исходить из паспортных характеристик, определяя требуемые для расчета коэффициенты C_{ω} и C_M непосредственно по характеристикам $C_{\omega} = \Delta \omega / \Delta U_y$, $C_M = \Delta M / \Delta U_y$. Оба коэффициента определяются на прямолинейных участках характеристик ($\alpha < 0,5$). Следует иметь в виду, что паспортные характеристики можно использовать только в случаях, когда сопротивления источников, питающих обмотку управления и возбуждения, малы по сравнению с собственным сопротивлением обмотки, то есть когда мощность источников велика по сравнению с мощностью двигателя. Если это условие не может быть соблюдено, то характеристики необходимо снимать экспериментально при питании двигателя от тех источников, с которыми он будет работать в системе, так как внутреннее сопротивление источников очень существенно влияет на вид характеристик.

Существенная нелинейность регулировочных и механических харак-

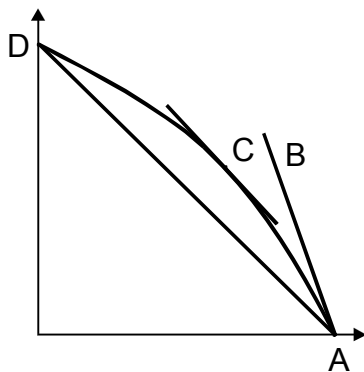


Рис.3.21. Линейризация характеристики

теристик исполнительных двигателей с амплитудным управлением сильно затрудняет исследование систем автоматического регулирования, содержащих такие двигатели. Поэтому при практических расчетах обычно применяют линейризацию (полную или на отрезке) этих характеристик (рис 3.21). Если скорость вращения изменяется в широких пределах, то линейризацию осуществляют либо с помощью прямой АВ, либо секущих АС и АД. Если основной режим работы двигателя - вращение со скоростью, близкой к номинальной, то целесо-

образно проводить линейризацию в точке С. При работе двигателя в следящих системах рекомендуется применять линейризацию секущей АС, либо АВ.

Относительные мощности для идеального двигателя с амплитудным управлением можно определить по формулам

$$p_y = P_y / P_K = 0,5 \alpha (\alpha - v); \quad p_e = P_B / P_K = 0,5 (1 - \alpha v), \quad (3.31)$$

где P_y, P_B - абсолютные значения мощностей управления и возбуждения соответственно; $P_K = M_{K0} \omega_1$ - электромагнитная мощность при пуске в круговом вращающемся поле.

На рис. 3.22,а приведены зависимости относительных мощностей управления p_y и возбуждения p_e от скорости вращения v для некоторых постоянных значений коэффициента сигнала α . Построенные графики на-

глядно показывают некоторые особенности асинхронного исполнительного двигателя (идеального) при амплитудном управлении:

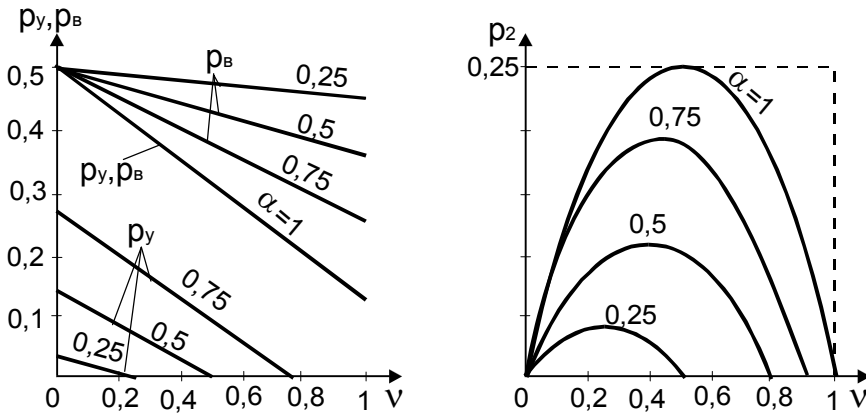


Рис.3.22. Мощности управления, возбуждения (а) и механическая (б) двигателя с амплитудным управлением

а) мощность, потребляемая обмоткой управления, резко падает с уменьшением коэффициента сигнала так, что иногда выгодно работать при малых напряжениях управ-

ления, поскольку это позволяет уменьшить размеры усилителя;

б) мощность возбуждения при пуске не зависит от коэффициента сигнала.

Механическая мощность двигателя в относительных единицах

$$p_2 = mv = \alpha v - 0,5(1 + \alpha^2)v^2. \quad (3.32),$$

При задании коэффициента сигнала максимум механической мощности имеет место при v_m , определяемой из уравнения $dp_2/dv=0$:

$$\alpha - v_m(1 + \alpha^2) = 0, \text{ откуда} \\ v_m = \alpha / (1 + \alpha^2) = 0,5 v_0. \quad (3.33).$$

Следовательно, максимальную мощность двигатель развивает при частоте вращения, равной половине частоты вращения при холостом ходе при заданном коэффициенте сигнала. На рисунке 3.22,б показано изменение механической мощности p_2 от частоты вращения v , при различных коэффициентах сигнала α . Из графиков следует, что при уменьшении сигнала управление использованием двигателя ухудшается. Следует подчеркнуть, что полученные выводы справедливы только для линейных (линеаризованных) характеристик.

У реального двигателя мощности управления и возбуждения существенно отличаются от соответствующих мощностей идеализированного двигателя. Это объясняется тем, что асинхронные исполнительные двигатели имеют большое значение тока холостого хода (в некоторых конструкциях до 85 ... 95 % от номинальной). Мощность возбуждения у реального двигателя остается практически постоянной при всех значениях сигнала управления и скорости вращения. Мощность управления у реального двигателя с амплитудным управлением практически не зависит от скорости вращения, но сильно изменяется с изменением коэффициента сигнала α .

Коэффициент полезного действия исполнительных асинхронных двигателей, особенно с полым немагнитным ротором, невелик:

$\eta=10\ldots 20\%$ при $\alpha=1$ и $v=0,5v_0$. При уменьшении α коэффициент полезного действия снижается, достигая единиц и даже долей процента.

Фазовое управление.

В этом случае относительное значение момента и частоты вращения для идеализированного двигателя имеют вид:

$$m = M / M_{ко} = \sin\beta - v = \alpha - v; \quad (3.34)$$

$$v = \sin\beta - m = \alpha - m. \quad (3.35)$$

Механические и регулировочные характеристики при фазовом управлении являются линейными и параллельными (рис. 3.23, сплошные линии). Данное обстоятельство является существенным достоинством этого способа управления. Особенно ярко оно проявляется при сопоставлении регулировочных характеристик, которые для идеализированного двигателя при фазовом управлении линейны, в то время как при амплитудном управлении существенно нелинейны.

Механические и регулировочные характеристики реального двигателя при фазовом управлении нелинейны (пунктирные графики на рис.3.23), однако нелинейность их меньше, чем при амплитудном управлении.

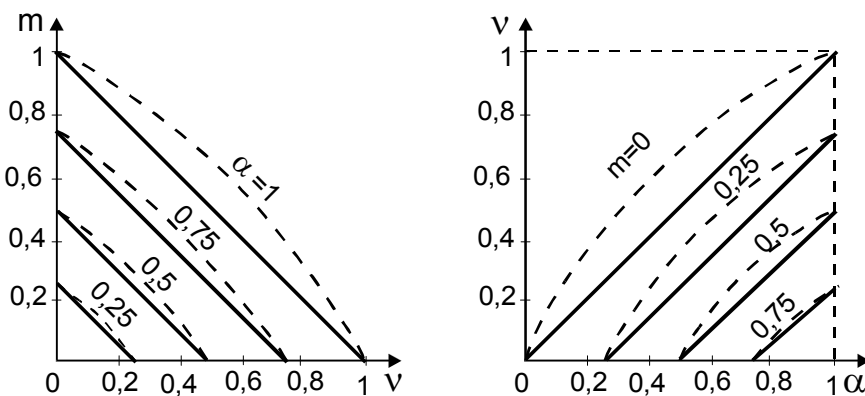


Рис.3.23. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики двигателя с фазовым управлением

рис.3.23), однако нелинейность их меньше, чем при амплитудном управлении.

Мощность управления при фазовом способе не зависит от коэффициента сигнала $\alpha = \sin\beta$, поскольку амплитуда сигнала управления постоянна. Это является

существенным недостатком, в известной мере ограничивающим применение рассматриваемого способа. Другим недостатком фазового управления по сравнению с амплитудным является, в общем случае, сравнительная сложность изменения фазы управляющего сигнала.

Механическая мощность двигателя при фазовом управлении имеет такой же вид, как и при амплитудном управлении (см. рис. 3.22,б).

Рассмотренные способы управления асинхронными исполнительными двигателями обеспечивают диапазон изменения скорости 1:100...1:200. Следует отметить, что при всех способах управления форма характеристик двигателя зависит от параметров двигателя и конечного каскада усилителя. В частности, механические характеристики, построенные без учета внутреннего сопротивления усилителя, существенно отличаются от характеристик, в которых эти сопротивления учтены.

3.2.2. Переходные процессы в двигателях переменного тока

В исполнительном двигателе переменного тока, так же и в двигателях постоянного тока, при включении имеет место два переходных процесса - электромагнитный и электромеханический. Однако из-за большого активного сопротивления ротора электромагнитный переходной процесс, определяемый электромагнитной постоянной времени $\tau_{эм} = L/R$, очень быстротечен по сравнению с электромеханическим переходным процессом. Поэтому на практике при исследовании систем, содержащих асинхронный исполнительный двигатель, используют передаточные функции в виде (3.21) или (3.23). При этом электромеханическая постоянная времени, так же как и для исполнительного двигателя постоянного тока с якорным управлением, в общем случае имеет вид:

$$\tau_m = J_{ДВ} \omega_{хх} / M_K = J_{ДВ} / F, \quad (3.36),$$

где $\omega_{хх}$ - скорость холостого хода; M_K - пусковой момент; F - коэффициент внутреннего демпфирования.

Необходимо иметь в виду, что для двигателя переменного тока выражение (3.36) является приближенным, так как получают его, проводя линеаризацию существенно нелинейных механических и регулировочных характеристик.

Коэффициент внутреннего демпфирования F при линеаризации по АС (см. рис. 3.19) можно определить по паспортным данным двигателя:

$$F = (M_{Пном} - M_{ном}) / \omega_{ном}, \quad (3.37)$$

где $M_{Пном}$, $M_{ном}$, $\omega_{ном}$ определяются при номинальном напряжении управления.

В двигателе с амплитудным управлением

$$\omega_0 = 2\alpha\omega_c / (1 + \alpha^2), \quad M_{П} = M_{П0}\alpha,$$

где $M_{П0}$ — пусковой момент при круговом поле. Поэтому

$$\tau_m = 2\omega_c J_{ДВ} / M_{П0}(1 + \alpha^2). \quad (3.38)$$

Из выражения (1.58) следует, что при амплитудном управлении электромеханическая постоянная времени τ_m увеличивается с уменьшением коэффициента сигнала, то есть U_y . Объясняется это снижением жесткости (наклона) механических характеристик при уменьшении α , то есть возрастания отношения $\omega_{хх}/M_{П}$ и уменьшением коэффициента внутреннего демпфирования F .

При фазовом управлении $\omega_{хх} = \alpha\omega_c$, $M = \alpha M_{П}$, поэтому

$$\tau_m = \omega_c J_{ДВ} / M_{П0}, \quad (3.39)$$

то есть электромеханическая постоянная времени при этом не зависит от коэффициента сигнала $\sin\beta$. Это объясняется тем, что при фазовом управлении механические характеристики параллельны при различных α , по-

этому при уменьшении коэффициента сигнала пропорционально снижается пусковой момент и скорость вращения при холостом ходе. В результате время разгона не изменяется. Электромеханическая постоянная времени реальных двигателей может быть несколько ниже, чем рассчитанная по формулам (3.38), (3.39). Из приведенных выражений также следует, что с увеличением частоты питающего напряжения и уменьшением числа пар полюсов при прочих равных условиях, постоянная времени τ_m возрастает, так как синхронная скорость изменяется по закону:

$$\omega_1 = 2\pi f / p,$$

где f - частота питания, Гц; p - число пар полюсов обмотки.

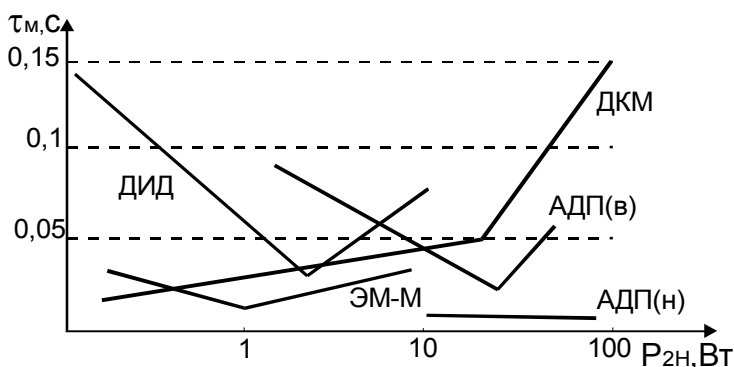
Поэтому двигатели, рассчитанные на работу при повышенной частоте тока (напомним, что это делается для повышения выходной мощности двигателя при тех же габаритах), несмотря на то, что их выполняют обычно многополюсными (обычно 2...3 пары), имеют большую постоянную времени, чем двигатели, рассчитанные на частоту питания 50 Гц. В таблице 3.1 приведены ориентировочные значения τ_m при круговом поле для асинхронных исполнительных двигателей мощностью 15...30 Вт.

Таблица 3.1

Тип двигателя	$\tau_m = 50$ Гц	$\tau_m = 400$ Гц
С полым немагнитным ротором	0,005 ... 0,1	0,02 ... 0,15
С ротором типа "беличья клетка"	-----	0,05 ... 1,5

В диапазоне мощностей в единицы и доли ватт двигатели с ротором "беличья клетка" имеют несколько большее быстродействие, чем двигатели с полым немагнитным ротором.

На рис. 3.24 приведены значения электромеханических постоянных

Рис.3.24. Значения τ_m для различных двигателей

$f=400$ Гц.

Значения τ_m у двигателей с полым немагнитным ротором и ротором типа "беличья клетка" сопоставимы. Это объясняется тем, что хотя мо-

менты некоторых серийных двухфазных исполнительных двигателей. При этом двигатели АДП – с полым немагнитным ротором (н-50 Гц, в-400Гц); ЭМ-М - с полым немагнитным ротором, $f=400$ Гц, $p=8$; ДИД - с полым немагнитным ротором, $f=400$ Гц; ДКМ – с ротором типа "беличья клетка",

мент инерции последнего выше, но у них больше пусковой момент за счет очень малого немагнитного зазора.

При питании двигателя от усилителя в переходном процессе напряжение на выходе усилителя уменьшается из-за падения напряжения в его выходном каскаде от пусковых токов двигателя. Поэтому постоянную времени двигателя следует увеличивать в отношении $(Z_H + Z_{ВЫХ}) / Z_H$, где Z_H и $Z_{ВЫХ}$ означают для асинхронного двигателя, соответственно, полное сопротивление нагрузки и полное выходное сопротивление усилителя.

Выходное сопротивление усилителя должно быть выбрано так, чтобы выполнялось условие максимальной отдачи им мощности. Данное условие является также условием получения наименьшей электромеханической постоянной времени при работе двигателя от усилителя.

В системах с двухфазным асинхронным двигателем согласование выходного сопротивления усилителя мощности с управляющей обмоткой двигателя, включенной на выходе усилителя, производится обычно с помощью трансформатора. При этом сопротивление выходного каскада усилителя, приведенное на вторичной обмотке трансформатора, должно быть равно сопротивлению обмотки управления. Это достаточно просто достигается путем подбора коэффициента трансформации трансформатора.

3.2.3. Индукторные исполнительные асинхронные двигатели

В качестве исполнительных в настоящее время применяются также индукторные исполнительные асинхронные двигатели (ИИАД) с трехфазными или двухфазными системами первичных и вторичных обмоток. При этом в общем случае двигатель содержит две первичных и две вторичных обмотки. В некоторых случаях в целях сокращения массы включаемых во вторичную обмотку конденсаторов, последняя выполняется однофазной.

Регулирование скорости вращения в этих двигателях может быть осуществлено теми же способами, что и в обычных исполнительных асинхронных двигателях – путем изменения амплитуды напряжения обмотки управления (амплитудное управление) либо ее фазы (фазовое управление).

Первичные обмотки возбуждения V_1 и управления U_1 имеют одинаковое число пар полюсов p_{s1} и сдвинуты в пространстве на 90 электрических градусов. Вторичные обмотки, которые также размещены в пазах статора, имеют числа пар полюсов p_{s2} , которые выбираются таким образом, чтобы исключить трансформаторную связь между обмотками фаз V_1U_1 и V_2U_2 по основной гармонике поля в воздушном зазоре. Зубчатый ротор обмоток не имеет и играет роль модулятора магнитного поля в воздушном зазоре. Число зубцов ротора должно быть согласовано с числом пар полюсов обмоток и числом зубцов статора. Питание первичных обмо-

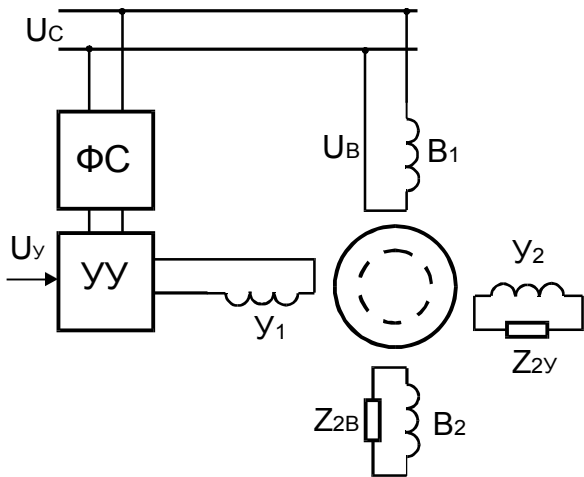


Рис.3.25. Амплитудное управление ИИД

Схема на рис. 3.26 обеспечивает фазовое управление путем изменения при помощи фазовращателя ФВ фазы напряжения обмотки управления. Для улучшения рабочих характеристик и в целях обеспечения отсутствия самохода при снятии сигнала управления вторичные обмотки B_2 и Y_2 включены на емкостные сопротивления Z_{2B} , Z_{2Y} , значения которых выбираются таким образом, чтобы получить максимальное значение момента вблизи пускового режима.

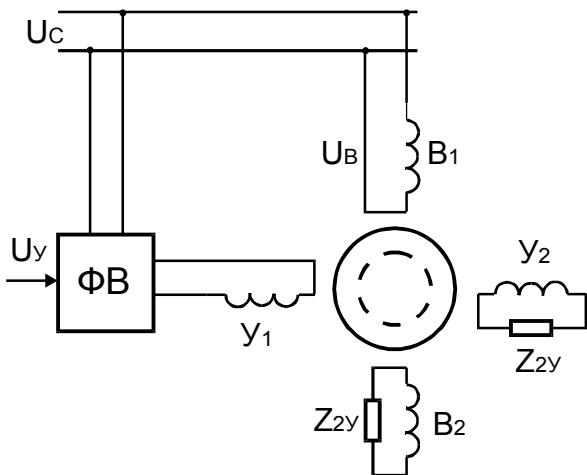


Рис.3.26. Фазовое управление ИИД

обмотки, то есть режим двигателя двойного питания. При питании вторичной обмотки от источника с угловой частотой ω_2 угловая частота вращения ротора $\omega_p = (\omega_1 - \omega_2) / z_p$ определяется значением частоты ω_2 . В режиме индукторного двигателя двойного питания механические характеристики индукторного двигателя абсолютно жесткие.

3.2.4. Шаговые двигатели

Шаговые двигатели (ШД) – это электромеханические устройства, преобразующие управляющие импульсы напряжения в скачкообразные угловые перемещения ротора с возможной его фиксацией в нужных положениях без датчиков обратной связи. Перемещение ротора под воздействием одного импульса называется шагом.

ток обычно осуществляется двухфазной системой напряжений.

На рис. 3.25 показан способ амплитудного управления ИИД, при котором обмотка возбуждения B_1 непосредственно включена в сеть, а обмотка управления Y_1 получает питание через усилитель УУ от источника сигнала управления; фаза сигнала управления должна быть сдвинута на 90° по отношению к напряжению возбуждения с помощью устройства ФС.

Для автоматических систем, в которых требуются низкие скорости вращения без применения понижающих редукторов и плавное регулирование, может применяться частотное управление со стороны вторичной

обмотки, то есть режим двигателя двойного питания. При питании вторичной обмотки от источника с угловой частотой ω_2 угловая частота вращения ротора $\omega_p = (\omega_1 - \omega_2) / z_p$ определяется значением частоты ω_2 . В режиме индукторного двигателя двойного питания механические характеристики индукторного двигателя абсолютно жесткие.

Шаговые двигатели в настоящее время используются достаточно широко прежде всего в системах, где напряжение управления вырабатывается ЦВМ. В этом случае преобразование цифрового кода в последовательность управляющих импульсов, требуемое для работы двигателя, осуществляется наиболее эффективно.

Интересно отметить, что первыми двигателями автоматических систем, созданных в первой половине 19 века, были шаговые двигатели. Они выполнялись с использованием электромагнита, перемещающего при подаче в него импульса напряжения храповое колесо на один зуб. Несмотря на наличие существенных недостатков, они еще находят ограниченное применение в некоторых устройствах.

Современные ШД являются по существу синхронными машинами. В отличие от обычных синхронных двигателей с распределенной обмоткой статора, рассмотренных выше, шаговые двигатели имеют сосредоточенные обмотки и питаются импульсами напряжения.

Обязательным компонентом шагового двигателя является коммутатор (в подавляющем большинстве случаев электронный), роль которого состоит в переключении обмоток управления ШД с последовательностью и частотой, соответствующими заданной команде. В общем случае шаговый двигатель совместно с коммутатором можно рассматривать как систему частотного регулирования угловой скорости двигателя, отличающуюся дискретным питанием обмоток прямоугольными импульсами напряжения и возможностью фиксации углового положения ротора. При этом результирующий угол поворота ротора ШД соответствует числу переключений, направление вращения – порядку переключений, а угловая скорость – частоте переключений.

В качестве шаговых обычно применяют синхронные двигатели без обмотки возбуждения на роторе – с постоянными магнитами (активные), реактивные и с подмагничиванием. Рассмотрим принцип действия ШД на примере двухфазной двухполюсной машины с постоянными магнитами

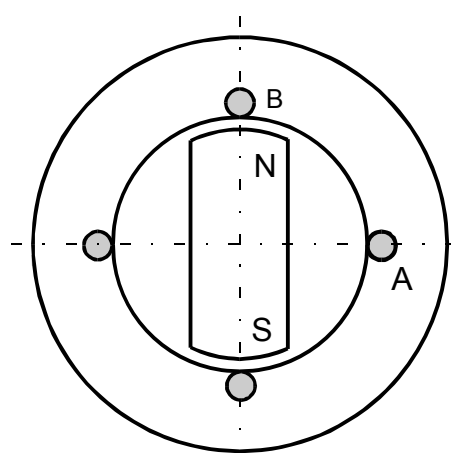


Рис.3.27. ШД активного типа

(рис. 3.27).

При подаче напряжения в фазу А магнитный поток статора совпадает с осью этой фазы. В результате его взаимодействия с полем постоянного магнита ротора возникает синхронизирующий момент, как и в обычном синхронном двигателе, в результате чего ось ротора совместится с осью фазы А. Если теперь отключить фазу А и подключить фазу В, то вектор магнитного потока скачком повернется на 90^0 . Возникший синхронизирующий момент заставит ротор скачком переместить-

ся также на 90^0 . При отключении фазы В и включении фазы А с обратной полярностью магнитный поток и ротор повернутся еще на 90^0 и т.д.

При рассмотренном способе переключения обмоток, который можно представить в виде последовательности +А, +В, - А, - В, шаг двигателя составляет 90^0 . Производя другую последовательность переключений в этом же двигателе, например, +А, (+А, +В), +В, (+В, -А), -А, (-А, -В), - В, (-В, +А), получим шаг поворота ротора в 45^0 , то есть в два раза меньше.

Следует отметить, что переход ротора из одного устойчивого положения к другому сопровождается колебаниями, обусловленными инерцией ротора. Эти колебания могут быть особенно значительными в режиме холостого хода.

Управление двигателем, при котором на всех тактах возбуждается одинаковое число обмоток, называется симметричным. Поочередное включение неравных групп обмоток называется несимметричным управлением.

Управление двигателем, при котором напряжение управления изменяется от нуля до $+U$ называется однополярным; при разнополярном управлении оно изменяется от $-U$ до $+U$.

При потенциальном управлении напряжение на обмотках изменяется только в моменты поступления управляющих импульсов на электронный коммутатор. При отсутствии сигнала на входе коммутатора обмотка находится под напряжением и положение ротора фиксируется полем возбуждения.

При импульсном управлении напряжение на обмотку подается только во время подачи команды; по истечении определенного времени обмотка обесточивается и ротор удерживается в заданном положении либо реактивным моментом, либо внешним фиксирующим устройством.

В общем случае число шагов результирующего потока статора и шагов ротора в пределах электрического угла 360^0 прямо пропорционально числу обмоток управления и зависит от схемы коммутации. Механический шаг, то есть угол поворота ротора при воздействии одного импульса управления и установленной схеме коммутации, определяется выражением

$$\alpha_{ш} = 360^0 / (m_y n_1 n_2 p), \quad (3.40)$$

где m_y – число обмоток управления; n_1 – коэффициент, равный 1 при симметричной и 2 при несимметричной коммутации; n_2 – коэффициент, равный 1 при однополярной и 2 при разнополярной коммутации; p – число пар полюсов ротора.

Увеличение числа пар полюсов ротора из постоянных магнитов при неизменном его диаметре ограничено технологическими возможностями и увеличением потока рассеяния между полюсами, поэтому обычно $p=4\dots 6$. Увеличение числа обмоток управления связано с усложнением коммута-

тора, обычно $m_y=2\dots4$. Поэтому у активных шаговых двигателей шаг составляет порядка $10\dots15$ градусов и более.

Ротор реактивного ШД выполняется из магнитомягкого материала и его конструкция аналогична конструкции обычного реактивного синхронного двигателя. Статор реактивного ШД аналогичен статору активного шагового двигателя.

При подаче управляющего импульса в статорную обмотку ротор реактивного ШД поворачивается на некоторый угол (шаг), занимая положение, при котором магнитная проводимость максимальна.

Существенное уменьшение шага, можно обеспечить, увеличив число выступов на статоре и роторе, фактически выполняя их зубчатыми, то есть переходя к принципу электромагнитного редуцирования скорости. При этом для используемых материалов статора и ротора можно получить зубцовое деление до 2 мм. Такие ШД называются реактивными редукторными. При большом числе зубцов ротора z_p его угол поворота значительно меньше угла поворота поля статора.

В реактивном двигателе изменение направления поля на 180° не влияет на состояние ротора, как в активном двигателе. Кроме того, полный период изменения магнитного сопротивления и магнитного поля в воздушном зазоре соответствует повороту ротора относительно статора на одно зубцовое деление. Это значит, что один зубец и один паз ротора реактивного двигателя эквивалентны паре полюсов активного двигателя. В общем случае шаг реактивного редукторного двигателя можно определить по формуле

$$\alpha_{ш}=360^\circ/m_y n_l z_p. \quad (3.41)$$

При одинаковом диаметре ротора в соответствии с технологическими возможностями у реактивного ШД можно выполнить значительно больше зубцов, чем полюсов постоянных магнитов у активного двигателя. Поэтому у реактивных ШД шаг достигает нескольких градусов и даже долей градуса.

ШД с подмагничиванием отличаются от рассмотренных реактивных тем, что в них применяется подмагничивание ротора. Оно может создаваться обмоткой постоянного тока или постоянными магнитами, находящимися на статоре. Однако чаще всего подмагничивание осуществляется за счет особого способа включения управляющих обмоток. Индукторные шаговые двигатели имеют несколько лучшие характеристики, чем реактивные, однако для них требуется более сложный коммутатор.

Режимы работы и характеристики шаговых двигателей. Для работы шагового двигателя характерным является регулирование скорости вращения в широком диапазоне путем изменения частоты подачи управляющих импульсов. Работу ШД считают устойчивой, если он работает без пропусков шага. Режим работы двигателя в значительной степени опреде-

ляется частотой управляющих импульсов.

В зависимости от частоты управляющих импульсов различают следующие режимы работы ШД: статический, режим отработки единичных шагов, установившийся и переходные режимы.

Статический режим соответствует прохождению постоянного тока по обмоткам управления, создающим неподвижное магнитное поле. Основная гармоника синхронизирующего момента при этом

$$M_C = M_{C \max} \sin(\theta_{1Э} - \theta_{2Э}),$$

где $M_{C \max}$ – максимальный синхронизирующий момент; $\theta_{1Э}$, $\theta_{2Э}$ – электрические углы поворота магнитодвижущей силы статора и оси ротора.

На рис. 3.28 сплошной линией показана зависимость синхронизирующего момента от

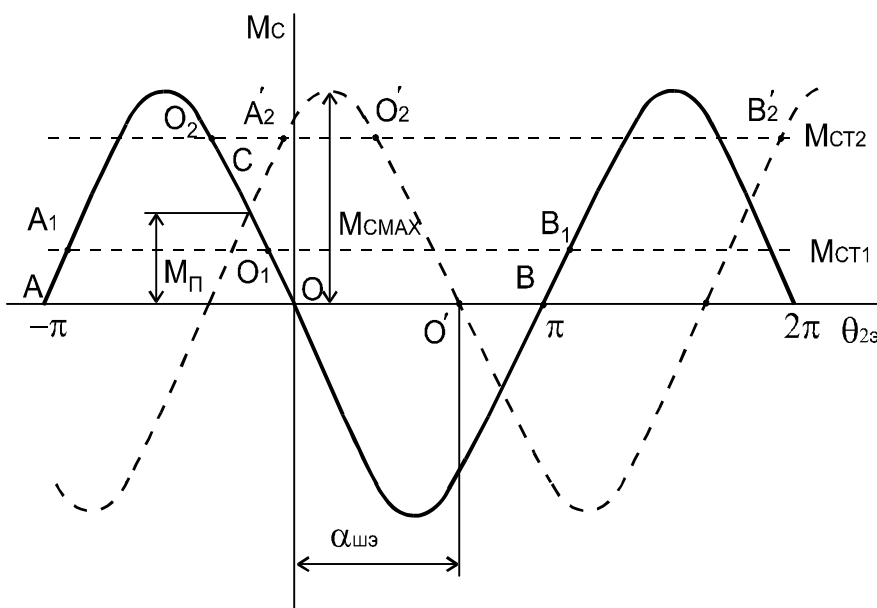


Рис.3.28. Зависимость синхронизирующего момента от угла поворота ротора

рующего момента от угла поворота ротора $\theta_{2Э}$ при фиксированном положении поля статора $\theta_{1Э}=0$.

Зоной статической устойчивости является окрестность точки устойчивого равновесия на угловой характеристике, из любой точки которой после снятия возмущающего воздействия ротор возвращается в исходную точку устойчивого равновесия.

При статическом моменте сопротивления $M_{CT}=0$ точка устойчивого равновесия – 0, точки неустойчивого равновесия – А и В. В случае наличия нагрузки зона статической устойчивости становится несимметричной.

Предельный момент сопротивления $M_{П}$, при котором возможен пуск двигателя, определяется точкой С пересечения исходной угловой характеристики с характеристикой, сдвинутой на один шаг (пунктирная линия на рис. 3.28). ШД активного типа, у которого возможна разнополярная коммутация, должен иметь не менее двух обмоток управления, а реактивные двигатели, у которых изменение направления поля на электрический угол 180^0 не влияет на состояние ротора, - не менее трех.

Статическая погрешность шагового двигателя – это отклонение установившегося действительного значения шага от идеального при подаче

сигнала управления. Статическая погрешность возрастает при колебаниях момента нагрузки на валу двигателя, так как изменяется угол между осью ротора и магнитодвижущей силой статора, соответствующей равновесию моментов, $M_C = M_{CT}$ (координата т. O_1 на рис. 3.28). Погрешность тем меньше, чем меньше нагрузка и чем больше крутизна начального участка угловой характеристики, то есть удельный момент. Например, в двигателях с гребенчатыми выступами на статоре и шагом в $1,5^\circ$ статическая ошибка составляет не более $0,5^\circ$.

Режим отработки единичных шагов (квазистатический режим) – это режим отработки единичных шагов, при котором переходный процесс на каждом шаге заканчивается к началу следующего шага, то есть угловая скорость ротора в начале каждого шага равна нулю.

Основными показателями этого режима являются: перерегулирование, то есть максимальное отклонение от нового положения устойчивого равновесия ротора при переходном процессе; максимальное значение мгновенной угловой скорости ротора в процессе шага; время затухания свободных колебания ротора на одном шаге. Для устранения колебаний ротора в конце шага применяют различные демпфирующие устройства и обгонные муфты. Предельную частоту квазистационарного режима повышают, увеличивая число обмоток управления и число тактов коммутации. При этом при отработке шага уменьшается угол перемещения и кинетическая энергия ротора, что снижает его склонность к колебаниям.

Установившийся режим – это режим, соответствующий постоянной частоте управляющих импульсов, причем время затухания переходных процессов больше времени одного такта коммутации. В этом режиме ротор двигателя имеет постоянную среднюю скорость вращения, но совершает вынужденные колебания относительно мгновенной точки устойчивого равновесия. Частота свободных колебаний ротора определяется выражением

$$f_0 \approx 0,135 \sqrt{M_{\max} p / (J_{ДВ} + J_H)}, \quad (3.42)$$

где M_{\max} – максимальный электромагнитный момент при неподвижном роторе; $J_{ДВ}$ и J_H – моменты инерции ротора и нагрузки, приведенной к валу двигателя.

При частоте управляющих импульсов f_1 , меньшей частоты свободных колебаний ротора f_0 , угловое перемещение ротора при каждом шаге сопровождается колебаниями (как и в квазистатическом режиме), которые существенно увеличивают динамическую ошибку при отработке ротором заданного перемещения. При частоте управляющих импульсов, совпадающей или в целое число раз меньшей частоты собственных колебаний f_0 , возникает явление электромеханического резонанса, когда амплитуда колебаний достигает наибольшего значения, а при слабом демпфировании

может вызвать нарушение периодичности движения ротора.

Внутреннее электромагнитное демпфирование колебаний ротора обеспечивается за счет наведения электродвижущей силы вращения в обмотках управления. Она вызывает дополнительные токи, которые во взаимодействии с вызвавшим их потоком создают демпфирующий момент асинхронной природы, значение которого пропорционально угловой скорости ротора:

$$M_{ДЕМ} = F d\theta/dt, \quad (3.43)$$

где F – коэффициент демпфирования.

Иногда используют относительный коэффициент затухания, под которым понимают отношение

$$\lambda = Fp/(2J). \quad (3.44)$$

При достаточно большом коэффициенте демпфирования происходит эффективное затухание колебаний ротора двигателя. При прочих равных условиях существенно больший коэффициент демпфирования имеют ШД активного типа. Затуханию колебаний способствует также наличие трения и применение внешних демпфирующих устройств. Наиболее радикальным методом устранения качаний ротора является гашение кинетической энергии, запасенной ротором при отработке шага, которое достигается за счет принудительного или естественного торможения ротора, то есть осуществление так называемого стартстопного управления.

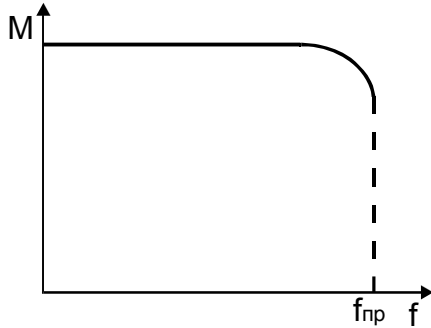


Рис. 3.29. Механическая характеристика ШД

Важной характеристикой установившегося режима работы является механическая характеристика шагового двигателя, под которой понимается зависимость момента, развиваемого двигателем, от частоты управляющих импульсов. Она определяет тот предел, до которого при данной частоте управляющих импульсов можно плавно нагружать двигатель, сохраняя при этом синхронный режим. Механическую характеристику обычно рассматривают при $f > f_0$.

Она имеет падающий характер (см. рис. 3.29). С ростом частоты управляющих импульсов сказывается запаздывание в нарастании тока, обусловленное индуктивностью обмоток L , определяющей электромагнитную постоянную времени $\tau_{эм} = L/R$, где R – активное сопротивление обмоток. Снижение синхронизирующего момента тем резче, чем больше электромагнитная постоянная времени. Часто для ее уменьшения последовательно с обмотками управления включают добавочное сопротивление с одновременным увеличением приложенного напряжения.

При некоторой предельной частоте управляющих импульсов $f_{пр}$ мо-

мент двигателя становится равным нулю.

Переходные режимы – пуск, торможение, реверс, переход с одной частоты на другую, являются основными эксплуатационными режимами ШД. Они сопровождаются переходными процессами в двигателе, вызванными изменением частоты управляющих импульсов и угловой скорости ротора. Основным требованием, предъявляемым к шаговым двигателям в этих режимах, является отсутствие потери шага.

Важным показателем рассматриваемого режима является приемистость шагового двигателя, под которой понимается предельная частота подачи управляющих импульсов, при которой ротор еще следует за скачкообразно изменяющимся полем статора без пропуска или добавления шага. Частота приемистости характеризует пусковые свойства ШД – максимальную частоту управляющих импульсов, при которой возможен пуск без выпадения из синхронизма. Она растет с увеличением синхронизирующего момента, уменьшением углового шага, нагрузках и момента инерции. Для современных шаговых двигателей при номинальной нагрузке частота приемистости составляет 100...1000 Гц.

В заключение отметим, что при высоких скоростях вращения (2000...3000 об/мин) обычно применяют ШД активного типа. При низких скоростях вращения (до 1000 об/мин) и малом шаге применяют индукторные и реактивные двигатели.

3.2.5. Датчики момента

Датчики момента (ДМ) или моментные двигатели являются специфическими исполнительными двигателями – в рабочем режиме их ротор либо неподвижен (режим короткого замыкания для обычного двигателя), либо вращается с малой скоростью. С учетом рабочего режима ДМ энергия, подводимая к нему из сети, почти полностью выделяется в виде тепла в обмотках.

В отличие от обычных двигателей основной величиной, определяющей свойства ДМ, является не значение механической мощности на валу (она здесь равна нулю, так как $n_2 \approx 0$), а значение развиваемого двигателем момента. Она обычно и указывается в паспорте двигателя.

Основными требованиями, предъявляемыми к моментным двигателям, являются:

- большое значение вращающего момента;
- линейность зависимости вращающего момента от величины управляющего сигнала;
- отсутствие самохода;
- малая величина остаточного момента;
- малая потребляемая мощность;

- малые габариты и масса;
- высокая надежность.

При этом датчики момента должны удовлетворять всем общим требованиям на элементы систем автоматического управления, в частности используемых на подвижных объектах.

Датчики момента широко применяются в качестве исполнительных элементов в современных системах автоматики, телемеханики, измерительной техники. Эти двигатели используются в гироскопах и акселерометрах, в приводах антенн, телескопов, фотоаппаратов, солнечных и звездных датчиков, роботов и манипуляторов, в автоматических построителях графиков, в качестве силовых компенсаторов в измерительных системах, в качестве электрогидравлических и электропневматических приводов, электрических пружин и т.д.

ДМ могут классифицироваться по их назначению, принципу действия, роду тока, по конструктивному выполнению. Рассмотрим классификацию моментных двигателей в зависимости от их назначения и краткие сведения об областях их применения.

В гироскопах широко применяются коррекционные датчики момента. В этих устройствах, находящихся обычно на борту подвижных объектов, ось ротора гироскопа под влиянием вредных моментов, изменения в процессе перемещения подвижного объекта географических координат и из-за вращения Земли изменяет свое положение относительно заданного. Задача коррекционного ДМ состоит в том, чтобы компенсировать соответствующие вредные моменты, либо создавать управляемую прецессию, обеспечивающую неизменность положения оси гироскопа относительно определенной системы координат. Момент таких коррекционных двигателей невелик и обычно составляет от нескольких десятитысячных до нескольких тысячных, а иногда до нескольких сотых ньютон-метра.

В системах управления и стабилизации, в частности гироскопической, положения в пространстве более крупных объектов (прицела, антенны радиолокатора, фотоаппарата, телескопа, секстанта, роботов, манипуляторов и т.д.) применяются стабилизирующие датчики момента, развивающие значительно большие моменты.

Нередко моментные двигатели используются в качестве силовых компенсаторов в измерительных системах с отрицательной обратной связью, реализуя компенсационный способ измерения и выполняя роль "электрической пружины". Так, в некоторых манометрах, акселерометрах, гироскопических датчиках угловой скорости и др. изменение положения чувствительного элемента под влиянием изменения контролируемой величины преобразуется в электрический сигнал, который после усиления подается в обмотку управления ДМ. При этом в нем возникает момент, удерживающий чувствительный элемент в нейтральном положении. По

величине тока, подаваемого в обмотку управления, судят о величине контролируемой величины. Использование компенсационного способа позволяет существенно снизить погрешность и расширить пределы измерения.

Нередко ДМ применяются в качестве натяжных устройств, позволяющих регулировать или сохранять неизменной силу натяжения ленты, пленки и т.д. Некоторые ДМ используются в автоматических построителях графиков. Они также широко применяются в различных пневмо- и гидросистемах, где обычно работают в пропорциональном режиме. К ДМ относятся также электромеханические узлы многих измерительных, оптических и других приборов, у которых момент, развиваемый двигателем, уравнивается механической пружиной, а выходом прибора является угол поворота, зависящий от сигнала, подаваемого в обмотку управления.

Следует отметить, что в некоторых случаях скорость вращения ротора ДМ в установившемся режиме может оказаться довольно значительной и тогда нельзя провести четкую грань между датчиками момента и тихоходными двигателями. В дальнейшем основное внимание будем уделять рассмотрению коррекционных датчиков момента, характерных для применения в гироскопической технике. Они могут быть использованы и в других случаях, где, кроме того, могут использоваться рассмотренные выше тихоходные двигатели.

В зависимости от требований, предъявляемых к ДМ при использовании их в различных схемах, их можно разбить на две существенно различающиеся группы. В первую группу можно включить датчики момента, используемые в системах начального приведения оси гироскопа, а также в системах коррекции гироскопа от какого-либо позиционного корректирующего устройства, когда коррекция производится непрерывно, а ее система является замкнутой и по структуре аналогична следящей системе. Датчики момента этой группы имеют ту общую особенность, что к ним не предъявляются высокие требования линейности характеристики, стабильности коэффициента передачи, а также постоянства этого коэффициента при различных положениях ротора датчика относительно статора и при различных состояниях окружающей среды.

Вторую группу составляют датчики, используемые в системах коррекции гироскопов, не имеющих обратной связи; в системах коррекции гироскопов от изодромных запоминающих устройств; в системах программного управления угловыми координатами подвижных объектов, когда введение программы осуществляется изменением пространственного положения оси гироскопа, являющегося индикатором рассогласования системы автоматического управления; в измерительных гироскопических приборах в случае применения компенсационного метода преобразования гироскопического момента в электрический сигнал. Во всех этих случаях точность работы системы зависит от постоянства коэффициента передачи

датчика момента, в связи с чем к ним предъявляются жесткие требования в отношении линейности характеристики, стабильности коэффициента передачи при изменении внешних условий, а также при повороте ротора датчика относительно его статора.

Датчики момента гироскопических устройств в большинстве случаев не имеют самостоятельной законченной конструкции. Это связано с тем, что обычно применяют встроенную конструкцию ДМ, когда ротор укрепляется непосредственно на оси подвеса гироскопа, а статор на детали, несущей подшипники этой оси. Это делается с целью снижения момента трения на осях подвеса гироскопа. С этой же целью не соединяют через редуктор ДМ с осью гироскопа, несмотря на то, что это позволило бы увеличить момент и уменьшить мощность и размеры датчика момента. Стремление ограничить момент сил сухого трения по осям подвеса гироскопа ограничивает также использование коллекторных ДМ постоянного тока из-за наличия у них трущихся о коллектор щеток.

По конструктивному исполнению ДМ могут быть с ограниченным углом поворота ротора и с неограниченным углом поворота. Первые имеют существенную зависимость развиваемого момента от угла поворота ротора и находят ограниченное применение. В качестве датчиков момента с неограниченным углом поворота ротора находят применение исполнительные двигатели с электромагнитной редукцией скорости, рассмотренные выше. При их выборе следует учитывать, что ДМ работает в режиме короткого замыкания. Более широко, однако, используются исполнительные двигатели переменного и постоянного тока с большим количеством пар полюсов.

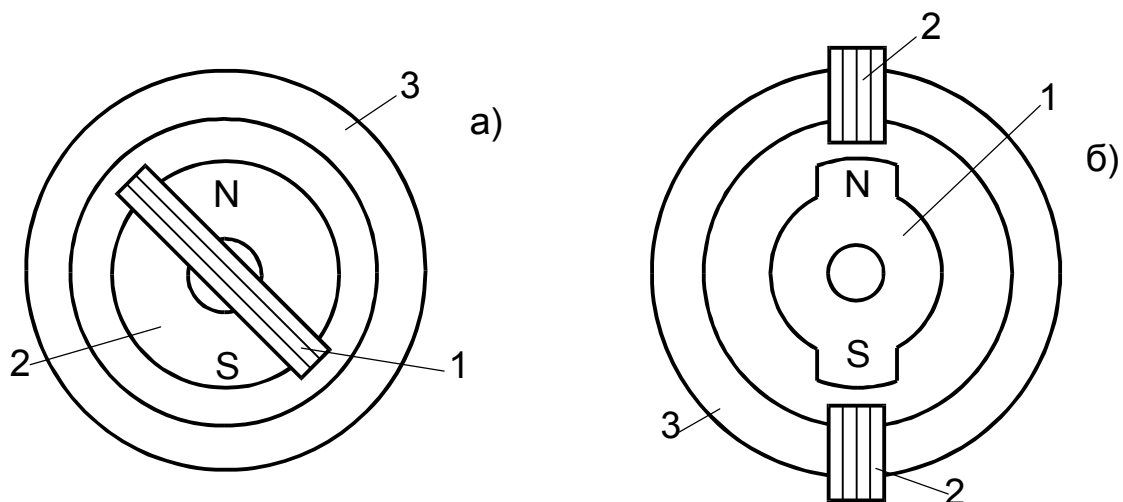


Рис. 3.30. Конструктивные схемы некоторых ДМПТ с ограниченным углом поворота ротора

Конструкции датчиков момента с ограниченным углом поворота ротора весьма многообразны. В качестве таких ДМ используются электро-

магнитные, магнитоэлектрические, электродинамические и поляризованные датчики. На рис.3.30 показаны некоторые конструктивные схемы датчики момента постоянного тока (ДМПТ) с ограниченным углом поворота ротора.

На рис. 3.30,а показан ДМПТ, у которого ротор содержит ОУ 1, расположенную на немагнитном каркасе и подключенную к системе питания гибкими проводниками. Неподвижный постоянный магнит 2 имеет цилиндрическую форму и расположен внутри статора 3.

У ДМПТ, изображенного на рис. 3.30,б, ротором может быть либо постоянный магнит 1 (в этом случае ОУ 2 расположена на статоре 3), либо подвижная ОУ. Постоянный магнит имеет явнополюсную форму. Рабочий диапазон углов поворота ротора такого датчика не превышает $30...40^\circ$.

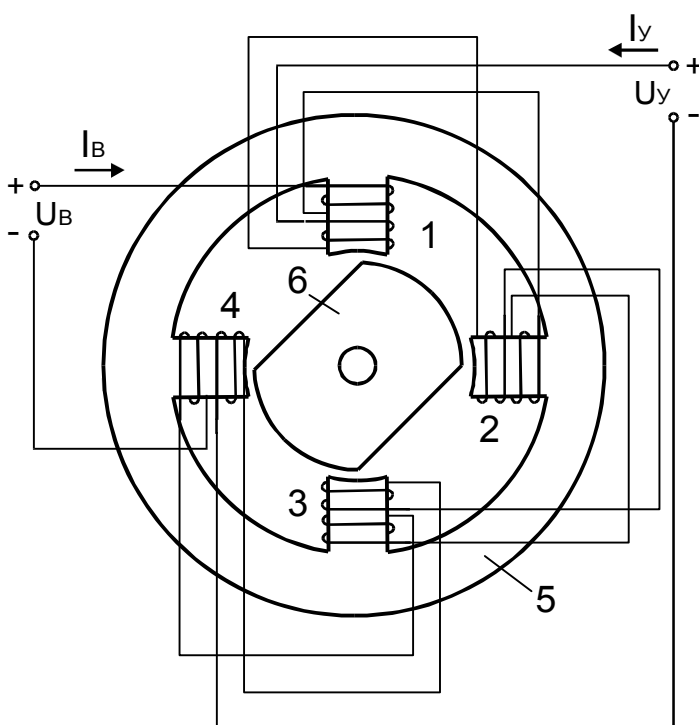


Рис.3.31. Микропин как ДМ

момента располагается в нейтральном положении. При подаче тока в ОУ возникает момент.

На рис. 3.32 показана магнитная цепь поляризованного ДМ. У этого датчика, как и у микропина, отсутствуют постоянные магниты, а их роль выполняет обмотка возбуждения. Статор 13 имеет 12 зубцов 1-12, а ротор 14-восемь. На зубцах 1, 4, 7 и 10 расположены катушки цепи возбуждения 16. Справа и слева от каждой катушки возбуждения располагается по одной катушке управления 17, полярности мдс катушек управления противоположны. Таким образом, при подаче тока в ОУ в четырех зубцах статора, содержащих катушки ОУ, индукции, обусловленные обмотками возбуждения и управления, складываются, и в четырех вычитаются. Каждые

В качестве ДМ с ограниченным углом поворота ротора может быть использован микропин при питании его обмоток постоянным током (рис. 3.31). Четырехзубцовый статор 5 микропина имеет обмотки управления и возбуждения на каждом из зубцов. При указанной на рисунке полярности питающих напряжений U_Y и U_B мдс обеих обмоток в зубцах 1 и 3 являются движущими, а 2 и 4 — тормозными (при изменении направления тока в ОУ движущими будут зубцы 2 и 4, а тормозными — 1 и 3). При отсутствии тока в ОУ ротор 6 под влиянием мдс обмотки возбуждения за счет реактивного

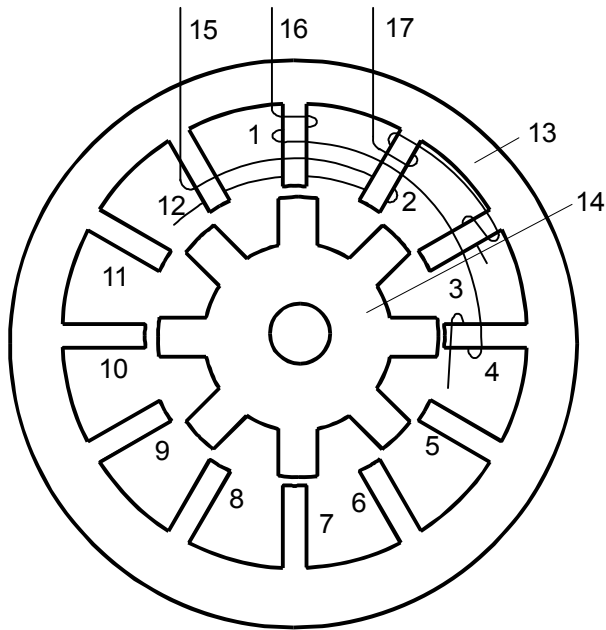


Рис.3.32. ДМ с электромагнитным возбуждением

большей частью рассчитанные на частоту 400, 500 или 1000 Гц. Первые используют для малых моментов, вторые – для больших. В тех случаях, когда необходимо полностью исключить реактивные моменты, короткозамкнутая обмотка заменяется алюминиевым или медным стаканчиком, который надевается на пакет стали ротора, изготовляемого в этом случае без пазов. Недостатком такой конструкции ротора является то, что при этом снижается значение вращающего момента и увеличивается энергопотребление из-за увеличения немагнитного зазора.

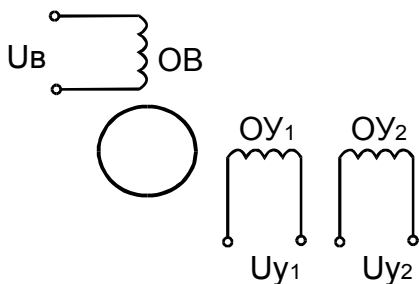


Рис.3.33. Электрическая схема двухфазного ДМ с двумя ОУ

Электрическая схема двухфазного моментного двигателя имеет такой же вид, как и обычного двигателя и приведена на рис. 3.17. Обмотки возбуждения (ОВ) и управления (ОУ) смещены в пространстве на 90° . В зависимости от условий применения в ДМ может быть несколько обмоток возбуждения и управления. Часто для изменения знака момента и упрощения системы управления коррекционные ДМ выполняют с "расщепленной" обмоткой управления, то есть состоящей из двух равных частей – правого и левого вращения (см. рис. 3.33). При этом в зависимости от схемы конкретного устройства, в котором применяется ДМ, одновременно может работать лишь половина обмотки, либо обе половины при их встречном включении.

Обычно обмотка возбуждения коррекционного ДМ получает пита-

три зубца статора охватываются дополнительной перематывающей обмоткой 15, питаемой переменным напряжением и предназначенной для уменьшения остаточной индукции в магнитной цепи.

В качестве датчиков момента с неограниченным углом поворота ротора широкое распространение получили многополюсные асинхронные ДМ, а также коллекторные и бесколлекторные ДМ постоянного тока.

Асинхронные ДМ - двух- и трехфазные асинхронные заторможенные двигатели с обычной короткозамкнутой обмоткой,

ние непрерывно, а ОУ лишь при необходимости создания момента. Часто обмотки ДМ питаются от той же сети, что и трехфазный гиродвигатель. Тогда для питания этих обмоток может использоваться одно и то же линейное напряжение, но ОВ и ОУ включаются через конденсатор. Для питания обмоток возбуждения и управления могут использоваться различные линейные напряжения. Иногда ОВ включается последовательно с одной из фаз гиродвигателя. Наконец, ОВ может иметь две секции, одна из которых включается последовательно с фазой гиродвигателя, а другая – на линейное напряжение. Использование ДМ с двумя обмотками возбуждения позволяет получить больший момент. Часто с целью сокращения времени прихода гироскопа в рабочее положение (после включения питания) обмотки возбуждения ДМ включаются последовательно с трехфазной обмоткой гиромотора. Следовательно, во время разгона гиромотора по обмотке возбуждения протекают пусковые токи гиромотора. Таким образом, в пусковом периоде коррекционный момент возрастает в 2...3 раза, что ускоряет восстановление оси гироскопа в надлежащее положение. Когда гиромотор достигнет номинальной скорости, ток и, следовательно, коррекционный момент снизятся до номинального значения.

В общем случае в двигателе имеет место вращающееся эллиптическое поле. За счет подбора параметров обмоток и дополнительных сопротивлений, включаемых последовательно с ОУ, сдвиг токов возбуждения и управления может составлять $80...100^\circ$ при сдвиге между напряжениями возбуждения и управления в 120° .

В тех случаях, когда на ДМ необходимо одновременно подавать несколько сигналов управления от различных датчиков, обычно применяют секторную конструкцию статора. При этом на каждом секторе статора располагаются независимые друг от друга ОВ и ОУ. На ротор ДМ при этом действует момент, равный алгебраической сумме моментов отдельных секторов. Практически те же результаты можно получить и без деления статора на сегменты.

Отметим, что повышение температуры обмоток ДМ на 110°C (с -60 до $+50^\circ\text{C}$) приводит к снижению момента приблизительно в два раза за счет увеличения их активного сопротивления и соответствующего уменьшения токов.

Асинхронные датчики момента имеют либо обычное исполнение – наружный статор и внутренний ротор, либо выполняются обращенными – с наружным ротором и внутренним статором. Во втором случае удастся при одном и том же наружном диаметре машины получить больший диаметр рашетки, а, следовательно, увеличить число зубцов и вращающий момент. Кроме того, удастся увеличить объем обмотки статора и тем самым снизить потребляемую мощность.

Асинхронные датчики момента целесообразно выполнять многопо-

люсными. Действительно, электромагнитный момент, развиваемый ДМ,

$$M_{ЭК} = pP_{ЭК}/f \quad (3.45)$$

прямо пропорционален числу пар полюсов p и обратно пропорционален частоте питания f при неизменном значении электромагнитной мощности короткого замыкания $P_{ЭК}$. Таким образом, для увеличения момента при $P_{ЭК}$ и $f = \text{const}$ необходимо повышать число пар полюсов, а это возможно лишь при соответствующем увеличении диаметра расточки и, следовательно, снижении отношения длины машины к ее диаметру расточки $\lambda = l/D$, называемым конструктивным коэффициентом. Действительно, число зубцов фазного статора

$$z_1 = pm_1q_1,$$

где q_1 – число пазов на полюс и фазу.

В то же время

$$z_1 = \pi D_1 / t_{z1},$$

где t_{z1} – зубцовый шаг статора.

Отсюда

$$p = (\pi D) / t_{z1} m_1 q_1 \cong D_1. \quad (3.46)$$

Также как и для исполнительного двухфазного асинхронного двигателя в пусковом режиме, эффективность преобразования электрической энергии ДМ можно характеризовать моментом, приходящимся на ватт потребляемой мощности,

$$m = M_{ном} / (P_1 + P_2) = pP_2 / 2\pi f (P_1 + P_2) = p / 2\pi f (1 + P_1 / P_2), \quad (3.47)$$

где P_1 – мощность, рассеиваемая в статоре.

Интересно отметить, что практически зависимость (3.47) нелинейна. При этом для каждого ДМ можно определить количество пар полюсов, доставляющих максимум функции (3.47).

Как правило, число пазов на полюс и фазу $q_1 = 1$, а зубцовый шаг выбирают минимально возможным по технологическим условиям – 1,5...4 мм. Поэтому обычно у асинхронных коррекционных датчиков момента число пар полюсов составляет 8...32, а конструктивный коэффициент имеет значение 0,1...0,2.

Вследствие технологических погрешностей в датчиках момента появляются остаточные моменты, а зависимость момента от управляющего напряжения оказывается нелинейной и несимметричной. Наиболее часто технологические погрешности ДМ сводятся к асимметрии магнитопровода, статора, электрической асимметрии ротора и эксцентриситету.

Наибольшее распространение среди датчиков момента *постоянного* тока получили ДМ с постоянными магнитами (ДМПМ). Как уже отмечалось, однако, коллекторные ДМ очень редко используются в качестве коррекционных для управления положением оси гироскопа из-за наличия достаточно большого момента сил сухого трения. В других случаях, в ча-

стности в гиросtabilизаторах, ДМ постоянного тока применяются широко.

Примером ДМПМ с неограниченным углом поворота ротора может служить многополюсная магнитоэлектрическая коллекторная машина с обмоткой якоря волнового типа. Недостатки коллекторных электродвигателей, которые, как правило, связывают с малой надежностью щеточно-коллекторного узла и радиопомехами, вызываемыми искрением из-под щеток при коммутации секций, в отношении коллекторных датчиков момента, работающих в заторможенном режиме, не так явно выражены. Применение волновой обмотки позволяет установить любое (вплоть до p) число пар щеток, что обеспечивает достаточно высокую надежность ДМПМ даже при значительных вибрациях и тряске. Естественная многофазность коллекторных ДМПМ делает их самыми точными (с точки зрения угловой стабильности момента) среди моментных приводов постоянного тока. В тех случаях, когда по условиям эксплуатации применение коллекторных ДМПМ недопустимо, находят широкое применение бесколлекторные ДМ.

Коллекторные ДМПМ обычно выполняются без дополнительных полюсов, многополюсными, с волновой обмоткой якоря и с числом щеток меньшим, чем число полюсов. Чтобы обеспечить малое переходное сопротивление и небольшое трение, щетки двигателя обычно выполняются из серебряных сплавов, а рабочий слой медного коллектора может быть легирован пленкой на основе Pd, Rh или Au.

Датчики момента обычно питаются от усилителей мощности с некоторым выходным сопротивлением, которое суммируется с активным сопротивлением обмотки и снижает электромагнитную постоянную времени. Если имеется отрицательная обратная связь по току, охватывающая усилитель, то электромагнитная постоянная времени может быть снижена во много раз.

Глава 4. Некоторые эксплуатационные характеристики двигателей

4.1. Показатели надежности двигателей

Самые совершенные начальные характеристики являются хотя и необходимыми, но еще недостаточными условиями высоких эксплуатационных качеств двигателей - они должны сохранять эти характеристики в течение всего срока эксплуатации, то есть обладать надежностью.

Надежность двигателя - это его свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Условия работы двигателей, используемых на подвижных объектах, в настоящее время существенно ухудшились за счет изменения в большом диапазоне вибраций, температуры, давления и т.д., связанных с совершенствованием подвижных объектов. Вместе с тем увеличились экономические потери, часто связанные с человеческими жертвами, от отказа электродвигателей, устанавливаемых на подвижных объектах. Все это приводит к тому, что проблема обеспечения надежности двигателей в настоящее время выходит на первый план. При этом надежность становится не только важнейшим техническим, но и экономическим показателем. Оптимальным является такой уровень надежности, при котором экономия от повышения надежности, достигнутая в процессе эксплуатации, перекрывает затраты по достижению этого уровня на этапах проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации.

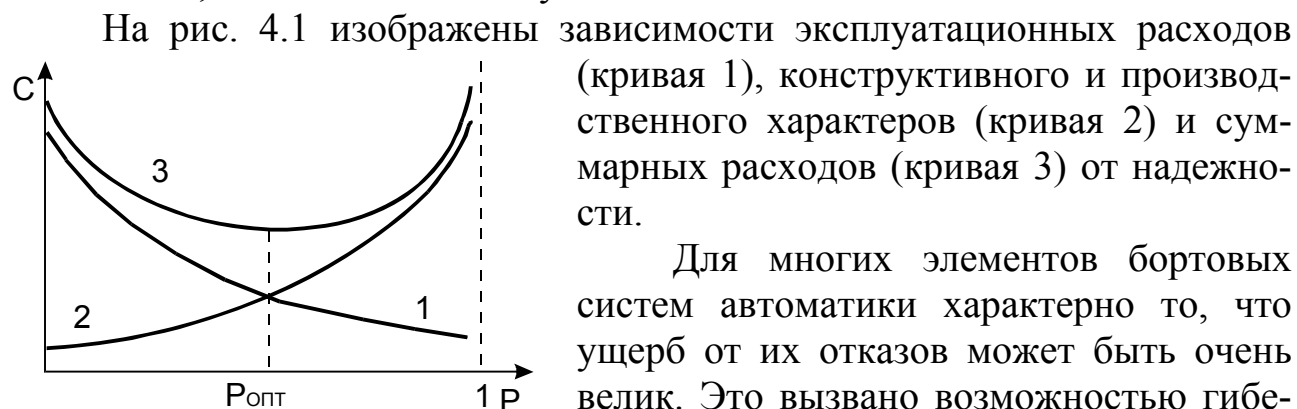


Рис.4.1. Зависимость затрат от надежности

Для многих элементов бортовых систем автоматики характерно то, что ущерб от их отказов может быть очень велик. Это вызвано возможностью гибели людей и дорогих подвижных объектов, невыполнением поставленной задачи военными подвижными объектами и т.д. В этих случаях оптимальное значение надежности P_{opt} сильно смещается вправо, что означает целесообразность обеспечения очень высокой надежности, а значит и вложение

очень больших средств.

Для электрических двигателей, как и для других элементов, имеют важное значение следующие определения:

Безотказность - свойство двигателя непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени.

Долговечность - свойство двигателя непрерывно сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания.

Ремонтопригодность - свойство двигателя, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость - свойство двигателя сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования.

Отказ - событие, заключающееся в нарушении работоспособности. По характеру возникновения различают отказы внезапные, характеризующиеся скачкообразным изменением одного или нескольких параметров двигателя, и отказы постепенные, характеризующиеся постепенными изменениями значений одного или нескольких заданных параметров. Внезапные отказы обычно проявляются в виде повреждений элементов (обрывы, пробой изоляции, образование трещин, поломки). Постепенные отказы связаны с износом и старением элементов и материалов (износ щеток, износ коллектора, старение изоляции и др.). По условиям создания и работы двигателей различают конструкционные, производственные и эксплуатационные отказы. Количественную оценку надежности двигателей производят методами теории вероятности и математической статистики.

В теории надежности отказы рассматривают как события случайные и, следовательно, все количественные показатели носят вероятностный характер. При анализе двигателей обычно пользуются следующими показателями.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ -вероятность того, что время работы двигателя до отказа больше или равно заданному промежутку времени

Статистическую оценку вероятности безотказной работы производят по формуле

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (4.1)$$

где N_0 - число двигателей в начале испытаний; $n(t)$ - число отказавших двигателей за время t .

Вероятность отказа двигателя:

$$Q(t) = 1 - P(t).$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ - вероятность отказов в единицу времени после данного момента времени:

$$\lambda(t) = f(t) / P(t),$$

где $f(t)$ - плотность вероятности отказов.

При $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, $P(t) = e^{-\lambda t}$.

Статистически интенсивность отказов определяют следующим образом:

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t)}{\Delta t N_{cp}}, \quad (4.2)$$

где $n(t)$ - число отказавших двигателей в интервале времени Δt ; N_{cp} - среднее число исправно работающих двигателей в интервале времени Δt .

Среднее время безотказной работы (средняя наработка на отказ) T двигателя

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt$$

характеризует средний промежуток времени от начала работы двигателя до первого отказа. На практике используется следующая оценка средней наработки на отказ:

$$T^* = \sum_{i=1}^{N_0} t_i / N_0, \quad (4.3)$$

где t_i - наработка до отказа i -го двигателя.

Техническая характеристика интенсивности отказов $\lambda(t)$ для электрических машин имеет вид, изображенный на рис.4.2. На участке OT_n интенсивность отказов относительно высока, но довольно резко снижается.

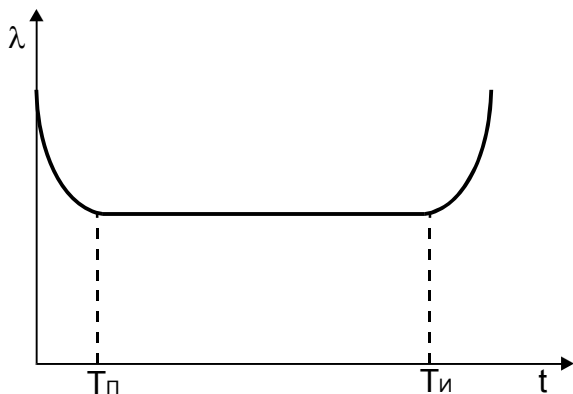


Рис.4.2. Интенсивность отказов как функция времени

Это участок приработки, на котором наиболее резко проявляются отказы из-за дефектов производства. Интервал $T_{II} - T_{II}$ характеризует период нормальной эксплуатации. После времени T_{II} интенсивность отказов резко возрастает, что объясняется механическим и электрическим износом двигателя.

Для периода нормальной эксплуатации: $\lambda(t) = \text{const}$, $P(t) = e^{-\lambda t}$; $T = 1/\lambda$.

Электрические микромашины

по надежности, как правило, уступают бесконтактным элементам автоматики, не имеющим подвижных частей. Например, интенсивность отказов некоторых элементов автоматических систем в час имеет значения, приведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Наименование	λ , отк/час
Электрические микромашины	$(0,01 \dots 8,0) 10^{-4}$
Трансформаторы	$(0,0002 \dots 0,64) 10^{-4}$
Резисторы	$(0,0001 \dots 0,15) 10^{-4}$
Полупроводниковые приборы	$(0,0012 \dots 5,0) 10^{-4}$

Таблица 4.2.

Тип двигателя	λ , отк/час	$T_{ГАР}$, час
1. Исполнительные микродвигатели постоянного тока, коллекторные, магнитоэлектрические типа ДПМ: 2500 об/мин 9000 об/мин	$(1,3 \dots 8) \cdot 10^{-4}$ —	1000 50...3000
2. Исполнительные микродвигатели постоянного тока, коллекторные, магнитоэлектрические, с полым немагнитным якорем типа ДПР: 2500 об/мин 9000 об/мин	— —	2000...3000 200...600
3. Исполнительные микродвигатели постоянного тока, магнитоэлектрические, с дисковым якорем типа ПЯ	$0,1 \cdot 10^{-4}$	500
4. Микродвигатели постоянного тока, бесколлекторные, магнитоэлектрические типа МБ (12500 об/мин)	—	10000
5. Исполнительные асинхронные микродвигатели с полым немагнитным ротором: типа АДП типа ЭМ-М типа ДИД	— — $2,9 \cdot 10^{-4}$	1500...2000 750...2150 1500...2000
6. Исполнительные асинхронные микродвигатели с ротором типа "беличья клетка" серии ДКМ	—	1000

С понятием надежности двигателя связано понятие долговечности, показателем которой может служить срок службы от начала эксплуатации до морального либо физического износа.

В таблице 4.2. приведены ориентировочные показатели надежности

некоторых типов исполнительных двигателей, где $T_{ГАР}$ – гарантируемый заводом срок службы.

Практика показывает, что в подавляющем большинстве случаев отказы двигателей происходят из-за повреждения обмоток, обусловленного в основном межвитковыми замыканиями. В меньшей степени отказы вызваны наличием скользящих контактов, щеток, подшипников и магнитной системы. Электродвигатели отказывают также из-за несоответствия их конструктивного исполнения условиям эксплуатации и неправильного выбора двигателя по мощности.

Следует отметить, что качество работы подшипников и скользящих контактов в значительной степени зависит от скорости вращения ротора двигателя. С увеличением скорости возрастает их износ, особенно щеток и коллектора, снижается надежность работы узлов, а, следовательно, и двигателя в целом.

На рис.4.3 показана зависимость среднего времени t_{cp} безотказной работы некоторых коллекторных микродвигателей постоянного тока от

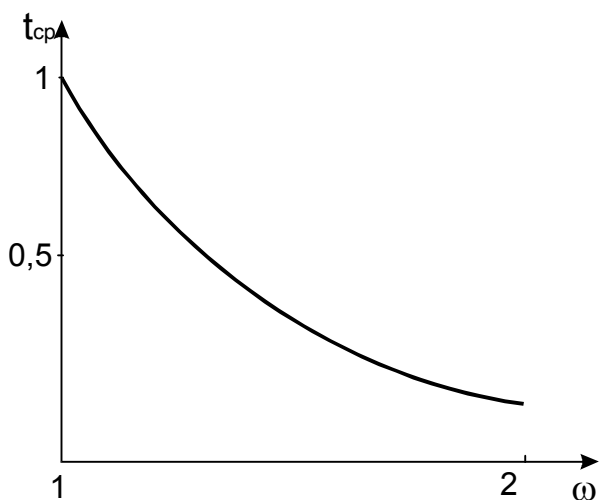


Рис.4.3. Зависимость среднего времени безотказной работы ДПТ от скорости

скорости ω , при которой они испытывались; за единицу принята номинальная скорость и время, соответствующее этой скорости. Следовательно, для повышения надежности электрических двигателей необходимо устранение скользящих контактов, то есть разработка бесконтактных конструкций. Например, гарантийный срок службы бесконтактных двигателей серии МБ при номинальных скоростях 12500 об/мин составляет в среднем 10000 часов, в то время как у коллекторных микродвигателей постоянного

тока даже при более низких скоростях существенно меньше. Сопоставление исполнительных двигателей переменного тока и коллекторных двигателей показывает, что время службы последних при одинаковых скоростях вращения роторов существенно ниже.

4.2. Особенности эксплуатации двигателей

На надежность двигателей в процессе эксплуатации влияют также ударные и вибрационные нагрузки, влажность, пониженное атмосферное давление, высокая температура. Последняя является одним из основных

факторов, влияющих на работоспособность двигателей.

Наибольшее влияние повышенная температура оказывает на работоспособность подшипникового узла. Нагрев ротора асинхронного двигателя и происходящее за счет этого увеличение его активного сопротивления практически не сказывается на поведении машины и величине момента, если критическое скольжение выбрано таким, при котором обеспечивается линейность регулирования.

Характер зависимости средней наработки до отказа двигателей от температуры окружающей среды показан на рис.4.4. При воздействии повышенной

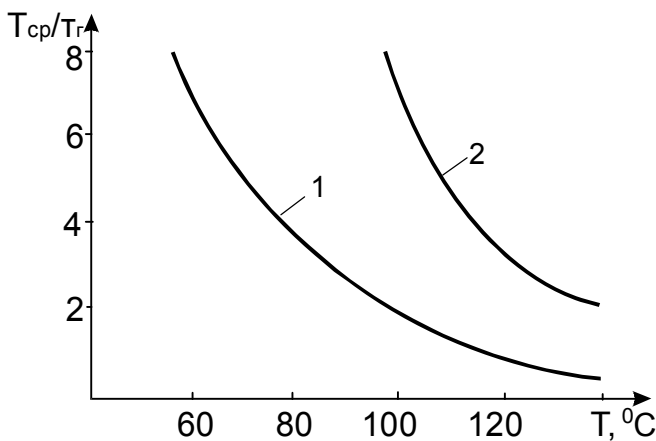


Рис.4.4. Зависимость среднего времени безотказной работы от температуры окружающей среды для ДПТ (1) и асинхронных двигателей (2)

температуры происходит также ухудшение электрических и механических свойств изоляции, вызванное процессами теплового старения, которое приводит к потере эластичности изоляции и снижению ее электрической и механической прочности.

Температура окружающей среды существенно влияет на гарантируемый заводами срок службы двигателей. Например, у исполнительных асинхронных микродвигателей серии ДИД-А гарантируемый срок службы при температуре окружающей среды 100°C

составляет 500 часов, но повышается до 1000 часов, если эта температура не превышает 70°C . Кроме того, превышение заданной техническими условиями температуры окружающей среды приводит к ухудшению рабочих характеристик двигателей, в частности двигатель может не развивать заданную мощность.

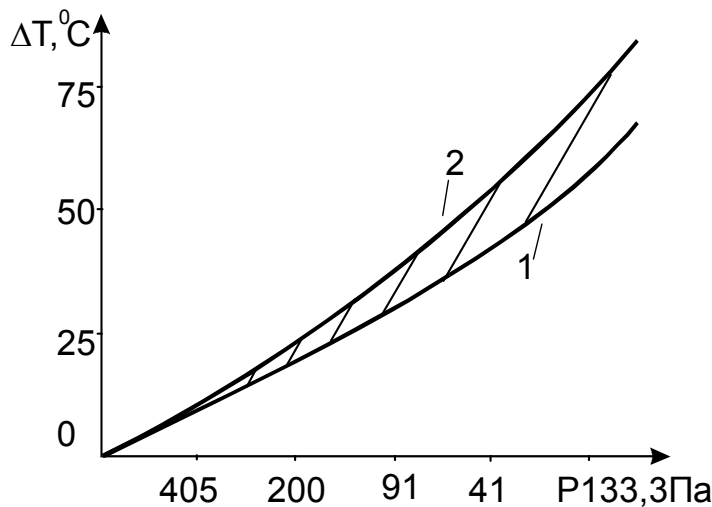


Рис.4.5. Область дополнительного нагрева двигателя при пониженном давлении

температуры окружающей среды приводит к ухудшению рабочих характеристик двигателей, в частности двигатель может не развивать заданную мощность.

Заметное влияние на долговечность двигателей, и в первую очередь коллекторных, оказывает понижение атмосферного давления. При его уменьшении ухудшаются условия теплоотдачи с поверхности двигателя,

так как уменьшается интенсивность конвекционного теплоотвода, а теплоотвод посредством излучения у микродвигателей составляет лишь 10 ... 15 % общей теплоотдачи. На рис.4.5 показана зависимость дополнительного нагрева коллекторных двигателей постоянного тока от пониженного давления при различной температуре окружающей среды. Кривая 1 соответствует номинальной мощности двигателя 8 Вт, а кривая 2 – 150 Вт. Для других видов двигателей характер зависимости сохраняется. Увеличение же температуры двигателя приводит к снижению его долговечности.

При работе коллекторных двигателей в условиях пониженного атмосферного давления кроме нагрева происходит ускоренный износ щеток, обусловленный тем, что при этом значительно уменьшается содержание влаги и кислорода в воздухе, нарушается процесс образования прослойки из окиси меди и графита на поверхности коллекторных пластин, что приводит к увеличению коэффициента трения щеток о коллектор и быстрому их износу.

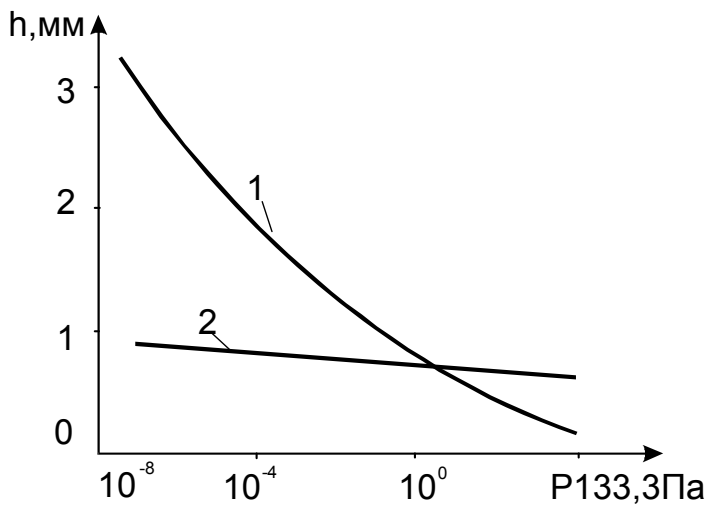


Рис.4.6. Износ щеток в условиях пониженного давления

графики, характеризующие износ щеток некоторых марок от атмосферного давления за 10 часов работы при плотности тока $(50...80)10^{-3}$ А/мм² и скорости скольжения щетки 2,5...3 м/с. Линия 1 соответствует марке щетки МГС-7И, а линия 2-щетке ВТ-1.

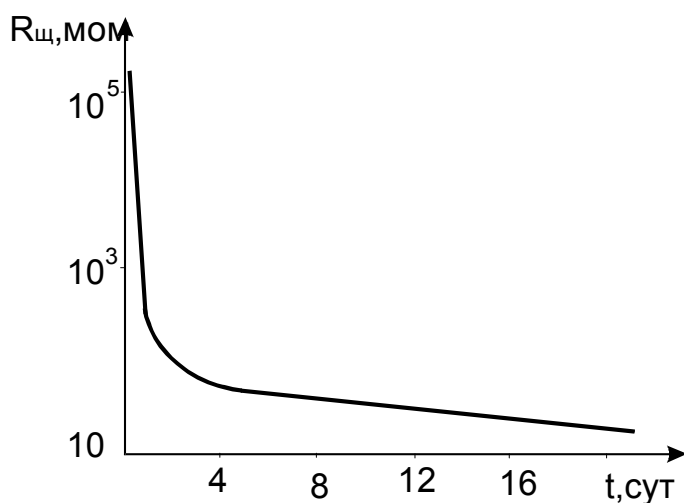


Рис.4.7. Зависимость сопротивления изоляции от времени выдержки при повышенной влажности

На рис. 4.6 приведены графики, характеризующие износ щеток некоторых марок от атмосферного давления за 10 часов работы при плотности тока $(50...80)10^{-3}$ А/мм² и скорости скольжения щетки 2,5...3 м/с. Линия 1 соответствует марке щетки МГС-7И, а линия 2-щетке ВТ-1.

При воздействии на электрические двигатели повышенной влажности окружающего воздуха происходит снижение сопротивления изоляции (рис.4.7), уменьшается ее электрическая прочность. Влага проникает в имеющиеся в изоляции микротрещины и способствует их развитию

(в совокупности с действием других факторов). Исследование ряда двигателей переменного и постоянного тока показывает, что отказы, обусловленные повышенной влажностью и температурой, составляют от 70% до 100% общего числа отказов, связанных с нарушением условий эксплуатации исполнительных двигателей.

Механические нагрузки оказывают наибольшее влияние на коллекторные двигатели. При воздействии механических нагрузок меняется переходное сопротивление между щеткой и коллектором. Воздействие вибрационных нагрузок на частотах, равных или кратных резонансной частоте щеточно-коллекторного узла может привести к весьма значительным изменениям переходного сопротивления. Это существенно ухудшает коммутацию и приводит к ускоренному износу щеток и коллектора, а также к повышению уровня радиопомех, а при ускорениях, достигающих определенных значений на этих частотах, может иметь место полный разрыв контакта.

Механические нагрузки могут приводить к короткому замыканию витков или обрыву провода обмоток, особенно если перед этим изоляция претерпела старение в результате других видов воздействий.

Механические нагрузки вызывают также обратимые изменения ряда параметров исполнительных двигателей, например, скорости вращения и потребляемого тока.

4.3. Нагрев и охлаждение двигателей

При электромеханическом преобразовании энергии часть потребляемой энергии всегда преобразуется в тепловую. Разность между потребляемой двигателем энергией и отдаваемой нагрузке называют потерями и для удобства сравнения с мощностью двигателя оценивают за единицу времени и выражают в единицах мощности.

Потери в двигателе в зависимости от вызывающих их физических процессов подразделяют на электрические, механические, магнитные, вентиляционные и добавочные (дополнительные). Каждый вид потерь локализован в определенных участках объема двигателя: электрические потери – в проводниках обмоток, соединительных проводах и скользящих контактах; магнитные потери на вихревые токи и гистерезис – в стали участков магнитопровода с переменным магнитным потоком; механические потери, включающие потери на трение в подшипниках, на трение вращающегося ротора о воздух и трение щеток о коллектор - соответственно в подшипниках, на поверхностях ротора и коллектора. В двигателях на вентиляцию расходуется часть электромагнитной энергии, поэтому она

увеличивает потребляемую двигателем мощность. Дополнительные потери подразделяют на потери холостого хода и потери короткого замыкания. Первые включают поверхностные и пульсационные потери, возникающие от пульсаций индукции в зазоре двигателя. Ко вторым относят потери в проводниках обмотки, обусловленные высшими гармониками поля, не учтенные в расчете других видов потерь.

Потери и характер их распределения в объеме двигателя формируют его температурное поле.

Двигатель считается выбранным правильно, если он выполняет заданные функции с допустимыми погрешностями и не перегревается, то есть изоляция его обмоток выдерживает температуру нагрева, которая не превышает допустимого предела, заданного техническими условиями. Если температура двигателя во время работы ниже допустимой, то это означает, что он недоиспользуется, а, следовательно, масса и габариты завышены.

Температура двигателя зависит как от тепла, выделяющегося в нем, так и от условий его охлаждения, изменяющихся в широких пределах при изменении температуры, влажности и плотности окружающего воздуха, применения тех или иных мер принудительного охлаждения.

Температуру нагрева двигателя можно определить, зная теряемую в нем мощность. Тепловой расчет с учетом всех явлений, происходящих в двигателе, является очень сложной задачей. При изучении процесса нагрева двигатель, строго говоря, нужно рассматривать как систему нескольких тел, связанных взаимными тепловыми потоками. При этом тепловой процесс описывается системой сложных дифференциальных уравнений, решить которую практически невозможно. Поэтому на практике применяют менее точные, но простые методы расчета тепловых режимов, рассматривая двигатель как однородное тело. В этом случае уравнение теплового баланса имеет вид:

$$P_H(t)dt = A\tau dt + C_m d\tau, \quad (4.4)$$

где $P_H(t)$ – мощность, которая превращается в тепло (потери); A – теплоотдача двигателя; t – время; C_m — теплоемкость двигателя; τ – превышение температуры двигателя над окружающей средой.

Из приведенного уравнения следует, что определенная доля потерь, выделяющаяся в двигателе с момента его включения, расходуется на нагрев, а остальные потери рассеиваются с поверхности в окружающую среду (соответственно второе и первое слагаемое первой части уравнения). По мере нагрева двигателя температура его повышается, все большая

часть тепла передается в окружающую среду и нагрев двигателя замедляется. При длительной ($t \rightarrow \infty$) работе с неизменной нагрузкой наступает тепловое равновесие, при котором уже все выделенные внутри двигателя потери рассеиваются в окружающую среду, а дальнейший нагрев двигателя прекращается. Такой режим называют установившимся тепловым режимом. Он характеризуется установившейся температурой двигателя τ_y .

Преобразуем уравнение теплового баланса (4.4) к виду:

$$T_H \frac{d\tau}{dt} + \tau = P_H(t)/A,$$

где $T_H = C_m/A$ – постоянная времени нагрева.

Так как постоянная времени T_H достаточно велика (обычно больше 10 мин.), а мгновенная мощность $P_H(t)$ в исполнительных двигателях изменяется весьма быстро, то температура нагрева двигателя мало отличается от значения, определяемого средней мощностью, теряемой в двигателе. Поэтому последнее уравнение можно переписать в виде:

$$T_H \frac{d\tau}{dt} + \tau = P_{Hcp}/A,$$

где $P_{Hcp} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} P_H(t) dt$ – среднее значение мощности, теряемой в двигателе за время работы t_p .

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-t/T_H} + \tau_y (1 + e^{-t/T_H}), \quad (4.5)$$

где $\tau_y = P_{Hcp}/A$ – установившееся значение температуры нагрева, которое имеет место при $t \rightarrow \infty$ (практически при $t = (3 \dots 4)T_H$); τ_0 – начальное (при $t=0$) превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

В зависимости от значений τ_y и τ_0 процесс изменения температуры может иметь разный характер. Например, при $\tau_0=0$, $\tau_y \neq 0$ происходит увеличение температуры нагрева от нуля до установившегося значения τ_y ; при $\tau_0 > 0$, $\tau_y = 0$ двигатель охлаждается до температуры окружающей среды.

Для двигателей в зависимости от условий нагрева и охлаждения различают три основных тепловых режима - продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

Продолжительным называют такой режим, при котором за время включенного состояния температура нагрева двигателя достигает установившегося значения. Такой режим имеет место при $t_p > (3 \dots 4) T_H$.

Кратковременным называют такой режим, при котором за время

включенного состояния температура нагрева двигателя не достигает установившегося значения, а за время паузы (остановки) t_n снижается до температуры окружающей среды. При этом обычно $t_p < T_H$, $t_n > (3...4)T_H$.

Повторно-кратковременным называют такой режим, при котором за время включенного состояния температура не достигает установившегося значения, а за время паузы двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Использование кратковременного и повторно-кратковременного режимов позволяет применять двигатели меньших габаритов за счет большего их нагружения.

При длительном режиме работы установившееся значение температуры нагрева должно быть равно или несколько меньше допустимой $\tau_{доп}$, то есть

$$\tau_y \leq \tau_{доп}. \quad (4.6)$$

В номинальном режиме установившаяся температура нагрева двигателя близка к $\tau_{доп}$. Поэтому

$$\tau_{доп} = P_{Hном}/A, \quad (4.7)$$

где $P_{Hном}$ – мощность, теряемая в двигателе в номинальном режиме.

На основании последних формул можно записать

$$P_{Hcp} \leq P_{Hном}.$$

В процессе работы двигателя в переходных режимах имеет место ухудшение теплоотдачи, связанное со снижением скорости вращения. Поэтому для исполнительных двигателей в последнюю формулу вводят коэффициент ухудшения теплоотдачи $k^* = 0,5 \dots 0,75$. Тогда последнее выражение принимает вид:

$$P_{Hcp} \leq k^* P_{Hном}. \quad (4.8)$$

Рассмотрим некоторые особенности нагрева исполнительных двигателей постоянного и переменного тока.

Мощность $\Delta P_{Я}(t)$, теряемая в обмотке якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при обеспечении требуемого закона движения вала, определяется выражением

$$\Delta P_{Я}(t) = R_{Я} i_{Яmp}^2(t) = \frac{R_{Я}}{C_M^2} M_{TP}^2(t), \quad (4.9)$$

где $R_{Я}$ – сопротивление обмотки якоря двигателя; $i_{Яmp}(t)$ – требуемый ток в обмотке якоря; M_{TP} – требуемый момент двигателя.

Мощность, которую необходимо подвести к двигателю, равна

$$P(t) = P_M(t) + \Delta P_{Я}(t) + P_B, \quad (4.10)$$

где $P_M(t)$ – требуемая механическая мощность; P_B – мощность, потребляемая обмоткой возбуждения.

В режиме движения выходного вала редуктора с постоянной скоростью Ω_H при моменте на валу $M_H = \text{const}$ имеем

$$\Delta P_{Я} = R_{Я} M_H^2 / C_M^2 i_p^2; \quad (4.11)$$

$$P = M_H \Omega_H + R_{Я} M_H^2 / C_M^2 i_p^2 + P_B. \quad (4.12)$$

где i_p – передаточное отношение редуктора.

Из формулы (4.12) следует, что мощность, потребляемая двигателем, уменьшается с уменьшением требуемой механической мощности. Это свидетельствует об экономичности регулирования скорости двигателя с независимым возбуждением и является его существенным достоинством. Из полученных соотношений видно также, что мощность, теряемая в двигателе, не зависит от скорости и определяется величиной требуемого момента на валу.

Энергетические характеристики асинхронного двигателя существенно зависят от режима работы, который может быть симметричным и несимметричным.

Представим выражение механической характеристики (1.30) для симметричного режима в виде

$$M = \frac{P_{Э}}{\omega_1} = M_{\max} \frac{2(1+\lambda)}{s/s_k + s_k/s + 2\lambda}, \quad (4.13)$$

где $P_{Э}$ – электромагнитная мощность; ω_1 – синхронная скорость; s – скольжение ротора; s_k – критическое скольжение;

$$M_{\max} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]}; \quad \lambda = \frac{R_1}{R_2} s_k.$$

Мощность, потребляемую двигателем, можно выразить через критическое скольжение (без учета мощности, потребляемой двигателем на холостом ходу):

$$P = P_K \frac{2(1+\lambda s/s_k)}{s/s_k + s_k/s + 2\lambda}, \quad (4.14)$$

где $P_K = m_1 U_1^2 \lambda / 2R_1$ – мощность, потребляемая двигателем при $s = s_k$.

На основании зависимостей (4.13), (4.14), (1.31), (1.32) отношение электромагнитной мощности к мощности, потребляемой двигателем, имеет вид

$$\eta_1 = \frac{P_{Э}}{P} = \frac{M\omega_1}{P} = \frac{1}{1 + \lambda s/s_k}. \quad (4.15)$$

При значениях требуемой скорости двигателя, которые по абсолютной величине меньше синхронной скорости, изменение знака момента двигателя осуществляется изменением направления вращения магнитного поля. Поэтому величину электромагнитной мощности, которую необходимо передать ротору для создания требуемого момента,, можно определить по формуле

$$P_{\mathcal{E}}(t) = M_{TP}(t) \omega_1 \operatorname{sign} M_{TP}(t). \quad (4.16)$$

На основании соотношений (4.15), (4.16) выражение для мощности, которую необходимо подвести к двигателю для обеспечения заданного закона движения выходного вала, имеет вид

$$P(t) = P_{\mathcal{E}}(t) / \eta_1 = P_{\mathcal{E}}(t) [1 + \lambda s(t) / s_k], \quad (4.17)$$

где $s(t) = 1 - \Omega_{TP}(t) / \omega_1 \operatorname{sign} M_{TP}(t)$.

Зная $P(t)$ и требуемую механическую мощность на валу двигателя, мощность, которая превращается в тепло, можно определить по формуле

$$P_H(t) = P(t) - P_{MEX}(t) = P_{\mathcal{E}}(t) / \eta_1 - M_{TP}(t) \Omega_{TP}(t), \quad (4.18)$$

или

$$P_H(t) = P_{\mathcal{E}}(t) (1 + \lambda / s_k) s(t). \quad (4.19)$$

Полученные соотношения показывают, что электромагнитная мощность однозначно определяется значением требуемого момента на валу двигателя и не зависит от требуемой скорости, в то время как мощность, потребляемая двигателем, и, особенно, потери мощности на нагрев существенно зависят не только от величины требуемого момента, но и от требуемой скорости.

Для режима движения с постоянной скоростью при $M_H = \text{const}$ имеем

$$P = \frac{M_H}{i_p} \omega_1 \operatorname{sign} M_H \left(1 + \frac{\lambda}{s_k} s \right); \quad (4.20)$$

$$P_{\mathcal{E}} = \frac{M_H}{i_p} \omega_1 \operatorname{sign} M_H \left(1 + \frac{\lambda}{s_k} \right) s, \quad (4.21)$$

где $s = 1 - \Omega_H / (i_p \omega_1 \operatorname{sign} M_H)$.

Для идеального двигателя, у которого $\eta_1 = 1$, $s_k = \infty$,

$$P = P_{\mathcal{E}} = \frac{M_H}{i_p} \omega_1 \operatorname{sign} M_H; \quad (4.22)$$

$$P_H = \frac{M_H}{i_p} \omega_1 \operatorname{sign} M_H s. \quad (4.23)$$

Из выражений (4.20), (4.22) следует, что с уменьшением требуемой мощности, мощность, потребляемая асинхронным двигателем при постоянном моменте нагрузки не уменьшается, как это имеет место у двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, а увеличивается. В лучшем случае, у идеального асинхронного двигателя она остается постоянной. Поэтому мощность, теряемая в асинхронном двигателе, с уменьшением скорости (с увеличением скольжения) в соответствии с выражениями (4.21), (4.22) увеличивается, а не остается постоянной. Это свидетельствует о неэкономичности регулирования скорости асинхронного двигателя при неизменной скорости вращающегося магнитного поля. В связи с этим в данном случае рациональным является частотное управление, в основе которого лежит непрерывное изменение частоты питающего напряжения.

При несимметричном управлении асинхронным двигателем, основанном на создании в машине эллиптического поля (напомним, что сюда относятся амплитудный и фазовый способы управления), потребляемая мощность больше мощности при симметричном управлении. В частности, при амплитудном управлении она больше на величину

$$\Delta P(t) = 2M_{OБP}(t)\omega_1 \text{sign}M_{OБP}(t) \left(1 + \frac{\lambda}{s_k}\right). \quad (4.24)$$

Следовательно, несимметричные способы управления с энергетической точки зрения еще менее экономичны. Поэтому их применяют главным образом лишь в маломощных приводах (менее 50 Вт).

Глава 5. Выбор двигателя

Выбор двигателя для привода (двигателя с редуктором и усилителем) различных автоматических систем – один из основных этапов проектирования системы. Это объясняется тем, что двигатель, с одной стороны, определяет тип, параметры и мощность предшествующих каскадов усилителей, а также мощность источника энергии. С другой стороны, от двигателя в значительной степени зависят динамические качества системы, которые он может обеспечить. Установка двигателей излишней мощности приводит к неоправданному возрастанию габаритных размеров и массы привода, ухудшению энергетических показателей и т.д. Двигатели, мощность которых ниже требуемой, не обеспечивают движение выходного вала по заданному закону или могут перегреться, следовательно, резко снижается срок службы привода.

Никакая система управления, никакие корректирующие устройства не могут создать требуемые вращающие моменты, угловые скорости и ускорения механизма, если они не обеспечены энергетикой конечного узла системы, каким является двигатель. При правильном выборе мощности двигателя температура его нагрева мало отличается от допустимой, а динамические возможности привода используются полностью.

Значения скоростей и ускорений, которые может развивать реальный привод, ограничены по величине. Если требуемые скорости и ускорения выше тех значений, которые может обеспечить привод, то попытки получения удовлетворительно работающего привода введением любых корректирующих устройств будут безуспешны. Корректирующие устройства предназначаются для обеспечения требуемой точности привода и более полного использования его динамических возможностей.

Мощность, которую привод может рассеивать, не нагреваясь свыше допустимой температуры, также ограничена по величине. Если мощность, теряемая в приводе в процессе работы в заданном режиме, выше допустимой, то необходимо использовать дополнительные меры охлаждения, сокращать время работы или применять другой, более мощный привод.

Предварительный анализ предъявленных к приводу требований обычно позволяет наметить необходимую серию двигателей. Конкретный тип двигателя выбирают исходя из условий работы конкретного привода, как правило, в зависимости от требуемой мощности. При выборе конкретного двигателя всегда рассматривают вопросы выбора и расчета редуктора, передаточное отношение которого, пока двигатель не выбран, неизвестно. Поэтому чаще всего двигатель приходится выбирать методом последовательных приближений, то есть пригодность выбранного в первом приближении двигателя проверяется детальным анализом его динамиче-

ских возможностей и энергетических характеристик. При этом находится также наиболее рациональное значение передаточного числа редуктора, требуемая мощность усилителя и источника питания, ряд других параметров привода.

Наиболее сложной, неоднозначной и ответственной задачей является выбор мощности исполнительных двигателей, в частности для следящих систем. Поскольку этот выбор зависит от характера возмущающих и управляющих воздействий, приведенных ко входу двигателя, то это возможно только тогда, когда известны все передаточные функции для возмущающих и управляющих воздействий замкнутой системы. Это обстоятельство существенно осложняет необходимые расчеты в сравнении с выбором мощности двигателя для обычного электропривода. Для выбора двигателей существенное значение имеет ранее накопленный опыт разработки и эксплуатации подобных систем.

5.1. Некоторые общие соображения при выборе двигателя

Проблема выбора номинальной скорости двигателя обычно ставится в широком плане и решается на основе опыта и в процессе совершенствования техники. Частное решение трудно проанализировать ввиду сравнительной общности постановки задачи - обеспечить высокие энергетические показатели привода, малые габариты и т.п. при ограниченности используемых образцов двигателей и редукторов.

Известная зависимость мощности электродвигателя от номинальной скорости дает лишь общее представление о том, что высокооборотные двигатели имеют меньшие габариты и вес по сравнению с тихоходными. Однако высокооборотные двигатели требуют применения редукторов с большими передаточными числами, что приводит к увеличению габаритов и веса редукторов. Указанные критерии нелинейно зависят от скорости, а также зависят от других факторов — мощности, типа, конструкции и т.д. Большое влияние на выбор номинальной скорости двигателя оказывают критерии обеспечения требуемых динамических свойств привода. Из условия уменьшения времени переходного процесса быстроходный двигатель менее выгоден, так как его скорость растет быстрее, чем уменьшается момент инерции. Однако при этом не учитывается увеличение момента инерции редуктора при увеличении его передаточного числа.

Следующим фактором являются потери энергии. При пуске или реверсировании двигателя они составляют примерно двойной или четырехкратный запас кинетической энергии:

$$\Delta A = (2 \dots 4) J_{дв} \omega^2 / 2 .$$

Поэтому из условия уменьшения потерь в этих режимах также более выгодным является тихоходный двигатель, так как потери пропорциональны квадрату скорости.

Ранее указывалось также, что высокая скорость вращения двигателя неблагоприятно сказывается на его ресурсе.

При подборе электродвигателя необходимо обращать внимание на условия его эксплуатации. Такие параметры окружающей среды как температура, давление, влажность существенно влияют на работу двигателя.

При низких температурах увеличивается вязкость смазочных веществ, следовательно, увеличиваются моменты сопротивления, а это может привести к перегрузке двигателя. При снижении плотности воздуха увеличивается износ подшипников и щеток, ухудшаются условия охлаждения. Изменение перечисленных параметров вызывает изменение электрических и механических констант материалов и, следовательно, рабочих характеристик двигателей.

Использование многих типов двигателей исключается, например, для работы в вакууме, в агрессивных средах, при наличии сильных радиационных излучений и т.д.

При выборе двигателя необходимо учитывать эксплуатационные требования – время готовности, безопасность, удобство в обращении, требования к контролю и др., а также габаритные и весовые ограничения.

На выбор двигателя могут влиять возможности и ограничения источника энергии. В общем случае целесообразно использовать двигатель такого рода тока, источник которого имеется в наличии. Однако в некоторых случаях приходится использовать соответствующие преобразователи энергии.

Для исполнительных двигателей особое значение имеет также мощность, необходимая для управления. Ограничения на выбор усилительных устройств системы также создают ограничения на выбор типа двигателя.

Для нерегулируемого привода длительного действия целесообразно выбирать двигатель, имеющий большой ресурс работы, высокий КПД и требуемую механическую характеристику. Если при этом требуется высокая стабильность скорости вращения, применяют синхронные двигатели или двигатели постоянного тока с регуляторами скорости. Для нерегулируемого привода кратковременного или повторно-кратковременного действия выбирают двигатели с незначительным ресурсом работы, но с большим значением пусковых моментов. Такими двигателями, например, являются высокооборотные коллекторные двигатели.

В следящих системах и в приводах с глубоким регулированием скорости вращения применяют двухфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и исполнительные двигатели постоянного тока.

В цифровых автоматических системах находят применение все типы исполнительных двигателей, в том числе шаговые.

В некоторых случаях целесообразно применение многополюсных низкооборотных двигателей (моментных датчиков), позволяющих обходиться без механического редуктора. При этом безредукторные двигатели

переменного тока часто не позволяют получить достаточно больших значений момента при приемлемых габаритах и мощности управления и возбуждения. Возможно использование безредукторных моментных датчиков постоянного тока, но при этом потребляемая мощность и вес получаются больше, чем у двигателя с редуктором. Несмотря на недостатки, такие моментные датчики находят достаточно широкое применение, в том числе в гироскопических стабилизаторах, так как позволяют обеспечить высокое качество стабилизации. В низкооборотных приводах находят также применение индукторные двигатели, волновые двигатели и двигатели с катящимся ротором.

Предварительный анализ требований к двигателю и условий его эксплуатации позволяет обычно наметить необходимую серию электродвигателей.

5.2. Анализ моментов нагрузки

Одними из важнейших исходных данных, необходимых при выборе исполнительного двигателя, является величина и характер изменения моментов, которые он должен преодолевать, определяющие в конечном итоге диапазон изменения скоростей, ускорений и моментов исполнительной оси.

В общем случае со стороны нагрузки имеют место следующие моменты:

1). Постоянный момент, не зависящий от параметров движения. В большинстве случаев в приборных системах такой момент отсутствует.

2). Позиционный (шарнирный) момент $M_{ш}$, зависящий от угла поворота δ . Этот момент создается аэро- и гидродинамическим напором (например, на рули, элероны, крылья), действием пружин, действием ветра (например, на радиолокационную антенну) и различных кинематических связей. Часто можно считать, что $M_{ш} \approx k_{ш}\delta$, где $k_{ш}$ – коэффициент шарнирного момента.

3). Момент, зависящий от скорости $\dot{\delta}$ органа управления $M_T = f(\dot{\delta})$. К этому моменту относятся в первую очередь момент сил сухого и вязкого трения.

4). Динамический момент $M_D = J_H \ddot{\delta}$, где J_H – момент инерции нагрузки. В большинстве случаев можно считать, что $J_H = \text{const}$.

В некоторых частных случаях приходится рассматривать и другие моменты, действующие со стороны нагрузки.

По характеру изменения моменты нагрузки могут быть разделены на постоянные или медленно меняющиеся и знакопеременные.

Для формулирования исходных данных, как правило, требуется достаточно глубокий и всесторонний анализ условий работы системы. Рассмотрим для примера некоторые особенности возмущающих моментов, действующих вокруг осей гироскопического стабилизатора при движении объекта.

При движении объекта с ускорением, вибрациями, при поворотах и

угловых колебаниях возникают возмущающие моменты вокруг осей карданового подвеса гиросtabilизатора. Постоянные и медленно меняющиеся моменты обусловлены, например, нестабильностью параметров, уходом гироскопов, неточной балансировкой карданового подвеса и т.д.; эти возмущения могут вызывать лишь медленные смещения стабилизированной платформы от заданного положения. Знакопеременные моменты имеют обычно частоты качки объекта и собственных колебаний системы стабилизации. Вызванные ими ошибки определяются динамическими свойствами системы стабилизации как системы автоматического регулирования.

Определение этих моментов необходимо для решения двух существенно различных задач - энергетического расчета при выборе привода системы стабилизации и определения параметров регулятора, обеспечивающих требуемую статическую и динамическую точность. Отметим здесь, что вопросы расчета погрешностей стабилизации выходят за рамки настоящего учебного пособия. Для указанных целей необходимо знать как величины, так и характер изменения отдельных составляющих возмущающего момента. В индикаторных платформах компенсация возмущающего момента происходит только за счет момента, развиваемого двигателем стабилизации. Поэтому в некоторых случаях при затруднениях в создании привода индикаторного стабилизатора с требуемыми динамическими характеристиками, возникает необходимость в переходе к силовой гироскопической стабилизации, то есть частотный спектр возмущений влияет и на тип применяемого в стабилизаторе чувствительного элемента.

Кроме того, даже небольшое и кратковременное превышение возмущающим моментом момента разгрузки приведет (ввиду малости рабочих углов прецизионных гироскопов) к потере устойчивости платформы. В связи с этим во многих случаях считают, что возмущающие моменты от каждого фактора действуют в одну сторону (складываются). Хотя этот режим маловероятен, подобный подход определяется высокими требованиями к надежности навигационного оборудования.

Отметим, что в силовом стабилизаторе постоянные и медленно изменяющиеся моменты уравниваются в основном моментами привода разгрузки, а знакопеременные, особенно быстро изменяющиеся, уравниваются как приводом разгрузки, так и гироскопическими моментами. В индикаторных стабилизаторах в компенсации возмущающих моментов участвует практически только привод разгрузки, который должен выбираться из условия уравнивания всех составляющих возмущающего момента. В связи с этим к двигателям привода разгрузки в индикаторных стабилизаторах предъявляются особенно высокие требования по точности и быстродействию.

Основные причины, вызывающие возмущения вокруг осей стабилизации, следующие:

- трение в осях карданового подвеса и в осях, кинематически связанных с осью подвеса;
- люфты рам карданового подвеса и остаточная несбалансированность;
- неравножесткость конструкции рам;
- взаимное влияние каналов стабилизации;
- инерция рам карданового подвеса (при некоторых типах эволюции объекта);
- инерция ротора (момент от обкатки) и противоэлектродвижущая сила двигателей стабилизации при угловом движении объекта (для гиростабилизаторов с редукторным двигателем).

Все перечисленные причины, кроме последней, вызывают появление возмущающих моментов по осям стабилизатора, которые не зависят от параметров привода разгрузки. Учитывая это, а также то, что эти возмущения достаточно полно исследованы в литературе, рассмотрим возмущения, вносимые инерционностью ротора и противоэлектродвижущей силы двигателя стабилизации при наличии редуктора.

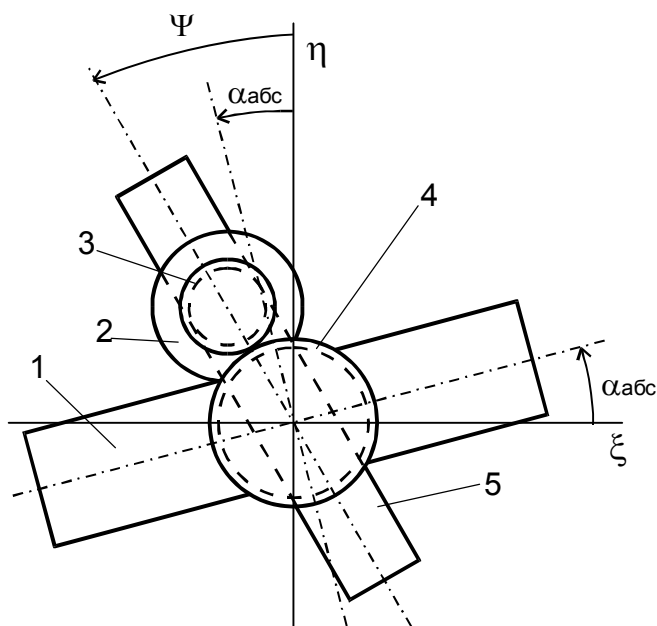


Рис.5.1. К определению приведенного момента инерции двигателя

Для безредукторного двигателя возмущающий момент практически не зависит от выбранного типа двигателя, так как в силу малых относительных скоростей ротора и статора момент от противоэлектродвижущей силы совершенно ничтожен. Иное дело для редукторного привода.

Момент трения в редукторе, момент от инерционности ротора и шестерен редуктора и момент от противоэлектродвижущей силы двигателя зависят как от типа двигателя, так и от передаточного числа редуктора.

Определим инерционный момент, развиваемый ротором двигателя 2 и приведенный к оси рамки 1 (рис. 5.1). Двигатель 2 установлен на корпусе 5 гиростабилизатора и передаточное число редуктора равно i . Угол поворота корпуса 5 относительно неподвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$ обозначим через ψ , а угол поворота рамки 1 относительно тех же осей через α_{abc} . Допустим, что рамка 1 неподвижна ($\alpha_{abc}=0$), а корпус 5 поворачивается. Координата ψ опре-

деляет переносное движение двигателя. При этом угол поворота ротора двигателя относительно абсолютного пространства равен $\pm i\psi + \psi$ (плюс или минус при $i\psi$ зависит от того, четное или нечетное число шестерен в редукторе). Момент, необходимый для вращения ротора двигателя 2 с ускорением, возникающим при движении корпуса 5 с ускорением $\ddot{\Psi}$, равен $J_{ДВ}(i\ddot{\Psi} + \ddot{\Psi})$, а момент, приведенный к оси 0 рамки 1, равен $J_{ДВ}(i\ddot{\Psi} + \ddot{\Psi})i$, где $J_{ДВ}$ – момент инерции ротора двигателя.

При повороте рамки 1 относительно неподвижного в абсолютном пространстве корпуса 5 с ускорением $d^2(\alpha_{abc})/dt^2$ также возникает возмущающий момент относительно оси 0 рамки подвеса, равный $J_{ДВ}d^2(\alpha_{abc})/dt^2 \cdot i^2$. В большинстве случаев эта составляющая в гиросtabilизаторах существенно меньше первой, вызванной поворотом корпуса. Поэтому в дальнейшем ее учитывать не будем.

Таким образом, момент от обкатки может быть представлен в виде

$$M_{ОБ}^{\circ} = J_{ДВ}i_p(i_p + 1)\ddot{\Psi} \cdot k_{un} \approx i_p^2 J_{ДВ} \ddot{\Psi} \cdot k_{un} \quad \text{при } i_p \gg 1,$$

где k_{un} – коэффициент, учитывающий приведенный момент инерции подвижных элементов редуктора (обычно $k_{un}=1,2\dots 1,4$); i_p – коэффициент передачи редуктора.

Момент от противоэлектродвижущей силы, имеющий характер вязкого трения, равен $M_{Д}^{\circ} = i_p^2 C_E \dot{\Psi}$, где C_E – коэффициент противоэдс двигателя.

При гармонической качке основания с частотой ω момент $M_{ОБ}^{\circ}$ опережает $M_{Д}^{\circ}$ на $\pi/2$. Поэтому амплитуда момента, вносимого двигателем, равна

$$M_{Д} = i_p^2 \sqrt{J_{ДВ}^2 \ddot{\Psi}^2 + C_E^2 \dot{\Psi}^2} \quad \text{или}$$

$$M_{Д} = i_p^2 C_E \dot{\Psi} \sqrt{\tau_m^2 \omega^2 + 1},$$

где τ_m – электромеханическая постоянная времени двигателя.

Для уменьшения возмущающих моментов, вносимых двигателем с редуктором, а также люфтов и угловых нежесткостей в редукторе, желательно использование редуктора с минимальным передаточным отношением (при обеспечении двигателем необходимого момента разгрузки). В этом случае рассматриваемый момент может быть сделан пренебрежимо малым.

Момент трогания двигателя, обусловленный трением в его опорах и трением щеток (в коллекторных двигателях), является, с учетом передаточного числа редуктора, составляющей общего момента трения.

Условия движения подвижного объекта на различных участках движения различны и, следовательно, на этих участках величины отдельных составляющих момента различны; поэтому суммарный возмущающий

момент определяют для наиболее характерных участков движения, а при определении необходимого максимального момента разгрузки исходят из наибольших величин, получаемых для рассчитанных участков движения. При таком подходе определения максимального момента разгрузки создастся некоторый запас по моменту привода, который необходим вследствие неточного знания эксплуатационных условий работы гироскопических стабилизаторов.

Спектр переменной части возмущений существенно зависит от типа объекта, использующего платформу.

Самолет в воздухе подвергается воздействию внешних возмущений, наиболее существенными из которых являются горизонтальные воздушные течения, воздушные ямы и восходящие потоки, порывы ветра, срывы аэродинамического потока и т.д. Характеристики угловых колебаний самолета существенно различаются в зависимости от его типа и загрузки. Собственная частота угловых колебаний самолета (максимум графика спектральной плотности) также весьма различна и лежит в пределах от 0,05 Гц для тяжелого лайнера до 3...4 Гц для малых истребителей.

Для ракет спектр частот вынужденных колебаний простирается до десятков герц, а величины скоростей угловых колебаний могут быть порядка нескольких радиан в секунду. Подвижные объекты на танковых шасси при движении по пересечённой местности совершают угловые колебания, по всем параметрам превышающие угловые колебания самолетов или судов. Спектр угловых колебаний имеет значительные составляющие до 200 и даже 300 Гц. Угловые ускорения при движении таких объектов существенно больше, чем при движении судна или самолета, поскольку угловые колебания довольно сильно отличаются от гармонических.

Моменты нагрузки в общем случае являются случайными функциями. Точное их определение возможно лишь на основе статистической обработки результатов многих измерений типовых нагрузок в реальных условиях работы системы. В связи с тем, что далеко не всегда известны статистические характеристики этих моментов, на практике часто пользуются представлением их детерминированными функциями.

5.3. Области требуемых и располагаемых областей моментов и скоростей

Назначение привода системы регулирования – воспроизведение заданного закона движения нагрузки с достаточными скоростями и ускорениями. Поэтому приступая к исследованию динамических возможностей привода необходимо прежде всего найти величины скоростей и моментов на валу двигателя, при которых обеспечивается требуемый закон движения выходного вала без учета моментов инерции редуктора:

$$\Omega_{TP}(t) = i_p \Omega_H(t); \quad (5.1)$$

$$M_{TP}(t) = (J_{ДВ} + \frac{J_H}{i_p^2 \eta}) i_p \varepsilon_H(t) + \frac{M_H}{i_p \eta}, \quad (5.2)$$

где i_p - передаточное число редуктора; $\Omega_{TP}(t)$ и $M_{TP}(t)$ - соответственно скорость и момент на валу двигателя, при которых обеспечивается требуемый закон движения выходного вала редуктора (требуемые скорость и момент на валу двигателя); $\Omega_H(t)$ и $\varepsilon_H(t)$ - заданный закон изменения скорости и ускорения выходного вала редуктора; $M_H(t)$ - момент нагрузки на выходном валу редуктора (за исключением динамического момента); $J_{ДВ}$, J_H - соответственно момент инерции двигателя и нагрузки; η - коэффициент полезного действия редуктора.

Одной из причин сложности исследования динамики привода состоит в том, что хотя моменты и параметры нагрузки известны, но при неизвестном двигателе неизвестны и параметры требуемого редуктора (его передаточное число, коэффициент полезного действия и моменты инерции шестерен).

Коэффициент полезного действия зависит от величины передаваемого момента и скорости, от состояния трущихся поверхностей, смазки, температуры, принципиальной и кинематической схемы редуктора и механизмов. Учет этой зависимости сложен и практически не решен. Поэтому обычно учитывают некоторый средний или номинальный кпд. На практике для оценки кпд при энергетическом расчете обычно используют следующие данные.

Ориентировочно кпд цилиндрической пары равен 0,9...0,94, конической пары - 0,88...0,92, червячной передачи $\eta = 0,9 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)}$, где α - угол наклона винтовой линии; β - приведенный угол трения.

Кпд планетарной (двухступенчатой) передачи $\eta = 1/[i - \eta_0(i - 1)]$, где η_0 - кпд обыкновенной передачи, составленной из тех же четырех зубчатых колес. Если, например, $\eta_0 = 0,96$, то $\eta = 0,05$ при $i_p = 500$.

Кпд волновой передачи $\eta = 0,8...0,9$ при передаваемой мощности до $3 \cdot 10^5$ Вт.

Кпд планетарных передач равен 0,26...0,96 в зависимости от $i = 50...900$ и числа зубьев сателлитов 60...15.

Кпд рычажных и шатунно-кривошипных передач оценивается величинами 0,7...0,98, реечной передачи - 0,9...0,94, карданной передачи - 0,9, а кпд различных соединительных муфт - 0,96.

При назначении ориентировочного значения кпд редуктора целесообразно использовать накопленный опыт проектирования конкретных систем. Например, на основании опыта использования гироскопических стабилизаторов можно ориентировочно считать, что при использовании исполнительных двигателей мощностью до 20 Вт, кпд редуктора $\eta = 0,7...0,9$, момент трения редуктора $M_{Г ред} = 5...15$ гсм; момент инерции редук-

тора $J_p = 0,005... 0,02$ г·см·с²; для двигателей мощностью от 20 Вт до 100 Вт КПД редуктора $\eta = 0,7... 0,9$; момент трения редуктора $M_{T\text{ ред}} = 10... 25$ гсм; момент инерции редуктора $J_p = 0,02... 0,2$ гсмс². При дальнейших исследованиях для простоты коэффициент полезного действия редуктора учитывать не будем.

Уравнение (5.1) и (5.2) можно преобразовать и представить момент M_{TP} как функцию Ω_{TP} . Такую зависимость требуемого момента двигателя M_{TP} от требуемой скорости двигателя Ω_{TP} в дальнейшем будем называть диаграммой нагрузки. Вид ее зависит от требуемого закона движения выходного вала, момента нагрузки, передаточного числа редуктора и других параметров привода.

Для примера рассмотрим случай, когда процессы в системе близки к синусоидальным, то есть требуемый закон выходного вала имеет вид

$$\begin{aligned}\delta_n(t) &= \delta_{nm} \sin \omega t; \\ \Omega_H(t) &= \frac{d\delta_n(t)}{dt} = \delta_{nm} \omega \cos \omega t; \\ \varepsilon_n(t) &= \frac{d^2\delta_n(t)}{dt^2} = -\delta_{nm} \omega^2 \sin \omega t,\end{aligned}$$

где δ_{nm} , ω - соответственно амплитуда и круговая частота колебаний выходного вала, которые должен обеспечить привод.

При этом будем считать, что преодолеть необходимо динамический и позиционный моменты. Тогда с учетом последних выражений зависимости (5.1) и (5.2) без учета КПД редуктора могут быть записаны в виде

$$M_{TP}(t) = \frac{1}{i_p} [k_u \delta_{nm} \sin \omega t - (J_{ДВ} i_p^2 + J_H) \delta_{nm} \omega^2 \sin \omega t] \quad \text{или}$$

$$\Omega_{TP}(t) = \Omega_{TPm} \cos \omega t;$$

$$M_{TP}(t) = M_{TPm} \sin \omega t,$$

где $\Omega_{TPm} = i \delta_{nm} \omega$ - максимальное значение требуемой скорости двигателя;

$M_{TPm}(t) = \frac{\delta_{nm}}{i_p} [k_u - (J_{ДВ} i_p^2 + J_H) \omega^2]$ - максимальное значение требуемого

момента на валу двигателя.

Поделив левые и правые части последних выражений соответственно на максимальные значения требуемых угловой скорости и момента, возведя полученные выражения в квадрат и сложив их, получим выражение для диаграммы нагрузки привода

$$\left(\frac{M_{TP}}{M_{TPm}} \right)^2 + \left(\frac{\Omega_{TP}}{\Omega_{TPm}} \right)^2 = 1. \quad (5.3)$$

Из полученного уравнения следует, что диаграмма нагрузки привода в рассматриваемом случае представляет собой эллипс с полуосями $M_{ТРm}$ и $\Omega_{ТРm}$ (рис. 5.2).

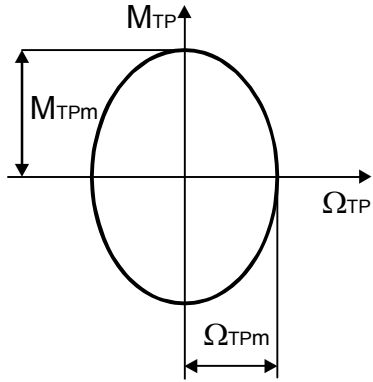


Рис. 5.2. Диаграмма нагрузки

В случае, когда отсутствует аналитическое выражение для диаграммы нагрузки или оно имеет сложный вид, анализ динамических возможностей привода целесообразно проводить по точкам, рассматривая ряд характерных точек диаграммы, соответствующих наиболее тяжелым участкам работы.

Очевидно, что для определения условий, при которых привод может обеспечить требуемый закон движения, необходимо сопоставить диаграмму нагрузки, определяемую действующими возмущениями, с границами располагаемых моментов и скоростей, определяемых в первую очередь типом и мощностью исполнительного двигателя и коэффициентом передачи редуктора.

Такое сопоставление получается наиболее наглядным, если на одном графике построить диаграмму нагрузки (требуемые моменты и скорости) и области располагаемых моментов и скоростей.

Область располагаемых моментов и скоростей, например, для исполнительного двигателя постоянного тока показана на рис. 5.3.

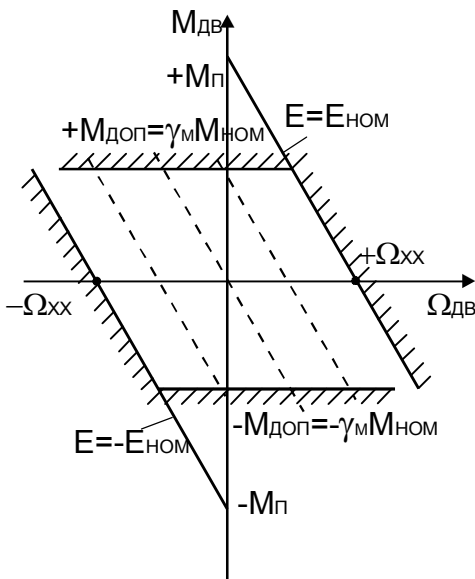


Рис. 5.3. Область располагаемых моментов и скоростей для ДПТ

Механические характеристики двигателя постоянного тока определяются выражением (1.39) и представляют собой семейство параллельных прямых, показанных на рис. 5.3 пунктирными линиями. При $U_V = U_{VНОМ}$ ($\alpha=1$) получаются левые и правые линии области. Верхняя и нижняя линии этой области определяются перегрузочной способностью двигателя и проходят параллельно оси скоростей на расстоянии $M_{ДОП} = \pm \gamma_m M_{НОМ}$, где γ_m – коэффициент перегрузки по моменту.

Таким образом, границы области располагаемых моментов и скоростей привода постоянного тока описываются по участкам следующими уравнениями:

$$M_{РАСП} = \pm M_{ДОП} = \pm \gamma_m M_{НОМ}; \tag{5.4}$$

$$M_{РАСП} = \pm M_H - F\Omega_H = F(\pm\Omega_{XX} - \Omega_{ДВ}), \tag{5.5}$$

где F – крутизна механической характеристики.

В приводах переменного тока при использовании исполнительных асинхронных двигателей с критическим скольжением $s_{кр} \gg 1$ механические характеристики достаточно линейны. Для этих двигателей область располагаемых моментов и скоростей может быть построена аналогичным образом.

Очевидно, что привод может обеспечить требуемый закон движения выходного вала редуктора лишь в том случае, когда диаграмма нагрузки всеми своими точками лежит в области располагаемых моментов и скоростей. Если диаграмма нагрузки хотя бы одной точкой выходит за пределы этой области, то в общем случае привод не способен обеспечить требуемый закон движения выходного вала.

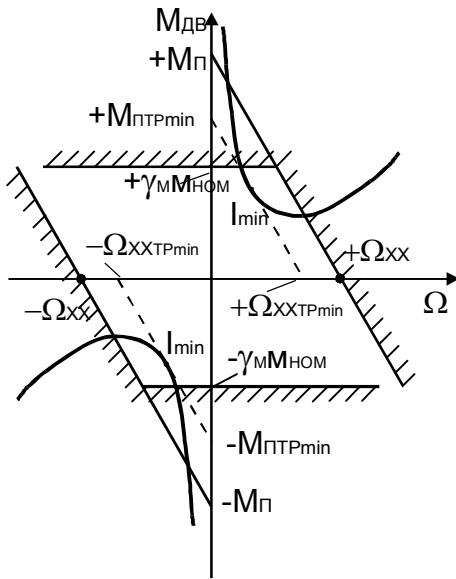


Рис. 5.4. Траектория точки диаграммы нагрузки при изменении i

Получим в аналитическом виде необходимые условия обеспечения приводом требуемого закона движения выходного вала. Вид и число этих условий зависит от характера диаграммы нагрузки и области располагаемых моментов и скоростей.

Обычно наиболее тяжелыми режимами являются режимы работы, когда знак требуемой скорости совпадает со знаком требуемого момента. Варьируя величиной передаточного числа редуктора, можно построить для конкретного двигателя кривую располагаемых моментов и скоростей (рис. 5.4).

Очевидно, что при некотором значении $\eta = \eta_{min}$ величина требуемого момента равна

$$+M_{ТРmin} \text{ или } -M_{ТРmin}.$$

Из условия $dM_{ТР} / di_p = 0$ найдем

$$I_{p min} = \sqrt{(J_H \varepsilon_n + M_H) / J_{ДВ} \varepsilon_n \eta}.$$

Подставив полученное значение в выражение (5.2) получим

$$M_{ТРmin} = 2 \sqrt{J_{ДВ} \varepsilon_n (J_H \varepsilon_n + M_H) / \eta}. \quad (5.6)$$

Отметим, что при $i_p = i_{p min}$ момент, идущий на преодоление инерции вала двигателя, равен моменту, который идет на преодоление инерции нагрузки и момента сопротивления.

Если $M_{ТРmin} > \gamma_m M_{НОМ}$, то траектории точки диаграммы нагрузки не заходят в область, ограниченную прямыми $\pm \gamma_m M_{НОМ}$, то есть в область располагаемых моментов и скоростей. Поэтому одно из необходимых условий обеспечения приводом заданного режима работы имеет вид

$$\frac{\gamma_m^2 M_{НОМ}^2}{M_{TP\min}^2} = \frac{\gamma_m^2 M_{НОМ}^2}{4J_{ДВ} \varepsilon_n (J_H \varepsilon_n + M_H) \eta} = \lambda > 1. \quad (5.7)$$

Отсюда виден физический смысл коэффициента λ , который равен квадрату отношения допустимого момента к минимальному значению требуемого момента на валу двигателя. Произведение требуемого ускорения на требуемый момент $\varepsilon_n (J_H \varepsilon_n + M_H)$ называют требуемой приемистостью, а величину $\gamma_m^2 M_{НОМ}^2 / 4J_{ДВ}$ - максимальным значением располагаемой приемистости двигателя. Динамические возможности привода зависят не только от его мощности, но и от приемистости.

Как уже отмечалось, вид диаграммы нагрузки существенно зависит от передаточного числа редуктора. При анализе динамических возможностей привода могут иметь место следующие случаи:

- не существует такого значения передаточного числа редуктора, при котором все точки диаграммы нагрузки лежат в области располагаемых моментов и скоростей. В этом случае необходимо брать другой исполнительный двигатель, который обладает большой областью располагаемых моментов и скоростей (то есть большей мощностью) и меньшем моментом инерции ротора;

- имеется некоторый диапазон значений передаточного числа редуктора, при котором диаграмма нагрузки всеми своими точками лежит в области располагаемых моментов и скоростей. Необходимо найти этот диапазон.

Зная диапазон значений коэффициента передачи редуктора, при которых привод может выполнять свои функции, можно произвести кинематический и силовой расчет редуктора исходя из того или иного критерия, например, из условия получения минимального приведенного момента инерции редуктора или минимума его габаритов.

При этом необходимо учитывать, что ко всем элементам привода и, в частности, к редуктору, часто предъявляются очень высокие требования к его точности. С этой точки зрения передаточное число редуктора стараются выбирать не более 200...300. Например, уменьшение передаточного числа редуктора повышает точность гиростабилизированной платформы в условиях высокочастотной качки. В прецизионных гиростабилизированных платформах применяют специальные меры, обеспечивающие выбор люфта. Самым распространенным из них является применение разрезной шестерни с разжимной встроенной пружиной, при этом люфт выбирают обычно в последней паре. Другой, иногда используемый способ выбор люфта, - применение в одном канале разгрузки двух одинаковых двигателей стабилизации, на которые подается напряжение антилюфта таким образом, что они работают от этого напряжения навстречу друг другу. На-

пряжение управления при этом подается так, что двигатели работают согласо.

Рассмотрим вопрос влияния механической характеристики двигателя

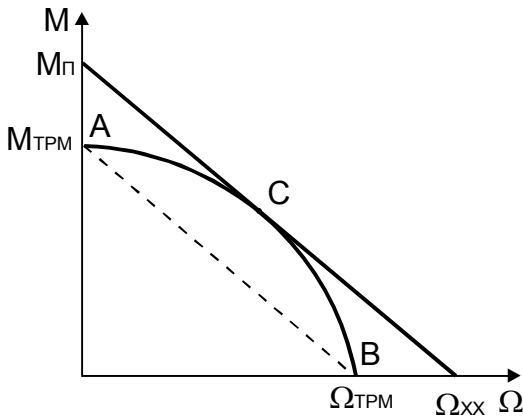


Рис.5.5. К построению желаемой механической характеристики двигателя

на энергетические характеристики привода. Будем считать, что процессы в системе близки к синусоидальным, а все моменты приведены к валу двигателя.

Различные касательные к диаграмме нагрузки как требуемые механические характеристики двигателя имеют различные значения пускового момента и скорости холостого хода (рис. 5.5). Поэтому и требуемые максимальные мощности будут различны. Можно показать, что при этом минимальная мощность получается для касательной, параллельной прямой AB.

Уравнение этой касательной, найденной из совместного решения уравнений эллипса, проходящего через точку C, касательной к эллипсу в точке C и прямой AB, имеет вид

$$\frac{1}{M_{ТРМ} \sqrt{2}} (M_H - M_T) + \frac{1}{\Omega_{ТРМ}} \Omega_H = 1.$$

Значения скорости холостого хода двигателя, пускового момента и крутизны механической характеристики, обеспечивающих заданное движение, в этом случае определяются из выражений:

$$\begin{aligned} M_{II} &= \sqrt{2} \delta_m (F - J_{II} \omega^2) + M_T; \\ \Omega_{XX} &= \sqrt{2} \delta_m \omega; \\ F &= [2\delta_m (F - J_{II} \omega^2) + M_T] / \sqrt{2} \delta_m \omega. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Следовательно, желаемая жесткость механической характеристики с точки зрения минимизации мощности двигателя зависит от параметров нагрузки, частоты и амплитуды колебаний. В частных случаях, когда на валу преобладает одна из указанных нагрузок, а другими можно пренебречь, выражения для F упрощаются:

$$\begin{aligned} F &= M_T / \sqrt{2} \delta_m \omega && \text{при } M_H \approx M_T; \\ |F| &= J_{II} \omega \sqrt{2} && \text{при } M_H \approx M_D; \\ F &= \sqrt{2} k_{ш} / \omega && \text{при } M_H \approx M_{ш}. \end{aligned}$$

Последние зависимости позволяют дать качественную оценку механической характеристике двигателя колебательной системы в зависимости от нагрузки. Увеличение частоты колебаний, например, требует уменьшения жесткости механической характеристики, если вал нагружен момен-

том трения и позиционным моментом. Если вал нагружен динамическим моментом, то требуется увеличение жесткости механической характеристики.

5.4. Выбор двигателя

5.4.1. Выбор силового микродвигателя

Длительный режим с постоянной нагрузкой на валу.

На основании предварительного анализа требований к двигателю и условий его эксплуатации намечают необходимую серию электродвигателей.

Минимально необходимая требуемая мощность двигателя

$$P_{ДВ} = \xi M_H \Omega_H / \eta, \quad (5.8)$$

где ξ - коэффициент запаса, учитывающий необходимость преодоления динамических нагрузок во время разгона; M_H - статический момент сил сопротивления на выходном валу редуктора; Ω_H - угловая скорость выходного вала редуктора; η - КПД редуктора.

Если не оговорено время переходного процесса, то принимают $\xi = 1,05 \dots 1,1$. Величины M_H и Ω_H должны быть заданы, величиной η задается. Чем меньше передаваемая мощность и больше передаточное число редуктора, тем меньшим значением η необходимо задаваться. Если нижний предел температуры равен $-50 \dots -60^\circ\text{C}$ и прибор не обогревается, принятое значение КПД необходимо уменьшить втрое, так как загустение смазки при низких температурах вызывает значительное увеличение потерь на трение.

По каталогу выбирают двигатель, номинальная мощность которого $P_{НОМ} \geq P_{ДВ}$. По его номинальной скорости вращения $\omega_{НОМ}$ определяют общее передаточное число редуктора $i_p = \omega_{НОМ} / \Omega_H$ и, составив его кинематическую схему, оценивают КПД. Если полученное значение КПД отличается от того, каким задались в начале расчета, следует уточнить мощность двигателя.

Если выбранный двигатель рассчитан на продолжительный режим, то на нагрев и перегрузочную способность его не проверяют.

Если задано также время переходного процесса (разгона), необходимо проверить достаточность развиваемого двигателем пускового момента $M_{П}$, учитывая, что в период пуска кроме статической нагрузки в механизме возникает и динамический момент

$$M_{П} \geq M_C / (i_p \eta) + M_{Д}. \quad (5.9)$$

Выбор двигателя в этом случае осложняется тем, что неизвестны все параметры редуктора (КПД, передаточное число и приведенный момент инерции) и два параметра двигателя (момент инерции и номинальная уг-

ловая скорость). Поэтому вначале двигатель выбирают ориентировочно, определяя его требуемую мощность по выражению (5.8), но принимая коэффициент $\xi=1,2\dots2,5$. Затем, рассчитав параметры редуктора, проверяют значение пускового момента двигателя по выражению (5.9). Если оно меньше необходимого, следует выбрать двигатель с большим пусковым моментом или большей мощностью.

При решении рассматриваемой задачи целесообразно общее передаточное число редуктора разбивать по ступеням так, чтобы получить минимальный динамический момент.

Считается, что нормальный срок службы электродвигателя исчисляется годами. Для случая, когда время двигателя в установке исчисляется существенно меньшими промежутками времени, его можно перегрузить. При этом в выражении (5.8) коэффициент ξ выбирается меньше единицы.

Для кратковременного режима работы могут быть выбраны электродвигатели длительной работы, кратковременного режима или специальные, рассчитанные для заданных условий.

Двигатели длительной работы в этом случае применять нецелесообразно, прежде всего, из-за ограничения электрических перегрузок и уменьшения КПД. В случае необходимости предварительный выбор двигателя длительного режима при использовании его в кратковременном режиме производят по формуле (5.8), приняв $\xi = 0,5\dots0,7$.

Обычно выбирают двигатели кратковременного режима работы, рассчитанные на время $t_{кр} = 15, 30, 60$ и 90 минут (или повторно-кратковременного), которые имеют большие коэффициенты перегрузок. Если время работы t_p совпадает с указанным в паспорте $t_{кр}$, то пересчет не требуется и выбор состоит в обеспечении условия

$$P_{НОМ} \geq P_{ЭКВ} ,$$

где $P_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}$ - эквивалентная по нагреву среднеквадратическая мощность.

Если время работы не совпадает с паспортной, то надо обеспечить условие $P_{НОМ} \geq \xi P_{ЭКВ}$, где $\xi = \sqrt{(1 - e^{-t_p/T_H}) / (1 - e^{-t_{кр}/T_H})}$, T_H - постоянная нагрева двигателя.

Выбор двигателя для повторно-кратковременного режима работы в принципе аналогичен предыдущему.

При выборе двигателя из серии для повторно-кратковременного режима надо определить продолжительность включения $\varepsilon = t_p / (t_p + t_n) 100\%$, где t_n - время паузы. Если ε отличается от каталожной (ПВ), то должно выполняться условие $P_{НОМ} \geq P_{Э} \sqrt{\varepsilon / ПВ}$.

5.4.2. Выбор исполнительного двигателя

Для исполнительных двигателей, работающих в режиме движения с переменной скоростью, расчет мощности двигателя не может дать сразу однозначное решение, так как величина требуемой мощности зависит от момента инерции ротора двигателя, передаточного числа и коэффициента полезного действия редуктора, которые на первом этапе расчета неизвестны. Поэтому выбор мощности двигателя осуществляется методом последовательных приближений, то есть в начале двигатель выбирается на основании приближенных соотношений, затем пригодность ориентировочно выбранного двигателя проверяется детальным анализом динамических возможностей и энергетических характеристик привода.

При правильном выборе мощности двигателя и передаточного числа редуктора, температура нагрева двигателя мало отличается от допустимой, а динамические возможности привода используются полностью. При этом существенное значение имеет также обеспечение минимальной скорости движения выходного вала редуктора и минимального значения электромеханической постоянной времени привода.

В самом общем случае, когда диаграмма нагрузки имеет сложный вид, может быть принят следующий порядок выбора двигателя и передаточного числа редуктора:

1. На основании детального анализа условий работы привода и предъявляемых к нему требований намечается серия электродвигателей.

В первом приближении выбирается двигатель по номинальной мощности.

Если необходим исполнительный двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, обладающий достаточно жесткими механическими характеристиками, то должны выполняться два соотношения:

$$P_{НОМ} \geq (1 \dots 2) [J_H \varepsilon_n(t) + M_H(t)] \Omega_H(t) / \gamma_m \eta;$$

$$\frac{M_{НОМ}^2}{J_{ДВ}} \geq 4 \frac{[J_H \varepsilon_n(t) + M_H(t)] \varepsilon_n(t) \eta}{\gamma_m^2}.$$

Параметры асинхронного двигателя с достаточно большим критическим скольжением, у которого механические характеристики мало отличаются от линейных, должны удовлетворять условию

$$P_{НОМ} \geq [J_H \varepsilon_n(t) + M_H(t)] \Omega_H(t) \left[1 + \frac{\varepsilon_n(t)}{\Omega_H(t)} \tau_m \right],$$

в котором величину τ_m ориентировочно можно принять равной $\tau_m = 0,05 \dots 0,1$ с.

В общем случае в качестве момента нагрузки целесообразно взять эквивалентный момент и среднеквадратическую скорость

$$M_H = M_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}; \quad (5.10)$$

$$\Omega_{CK} = \Omega_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Omega_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}},$$

где M_i , Ω_i , t_i – нагрузочные моменты, угловые скорости нагрузки и интервалы времени, в которые они имеют место.

В отдельных случаях (например, для гироскопических стабилизаторов) необходимо определить моменты времени, при которых правые части приведенных соотношений максимальны.

2. Уточняется вид механических характеристик и другие параметры двигателя, определяющие динамические возможности привода ($J_{ДВ}$, γ_m и т.д.).

3. Определяется диапазон возможных значений передаточного числа редуктора. Если не существует такого значения i_p , при котором привод может обеспечить заданный закон движения выходного вала, то необходимо брать другой двигатель, который обладает большей мощностью или приемистостью.

4. Из числа возможных значений i_p , выбирается наиболее рациональное, при котором обеспечиваются запасы по скорости, моменту и ускорению, а также удовлетворительные значения электромеханической постоянной времени и минимальной скорости вращения вала.

Производится кинематический и силовой расчет редуктора и определяется КПД передачи.

5. Определяется среднее значение мощности, идущей на нагрев двигателя. Поскольку определение потерь в двигателе является весьма трудоемкой задачей, широко используют менее точные, но более простые методы эквивалентных величин: тока, момента и мощности. В каждом из этих методов по построенной для предварительно выбранного двигателя диаграмме определяют значение эквивалентной величины: для момента по формуле (5.10), для тока и мощности – по формулам

$$I_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad P_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}. \quad (5.11)$$

После вычисления сопоставляется соответствующая эквивалентная величина с номинальной. Если номинальное значение оказывается не меньше эквивалентного, двигатель по мощности выбран правильно. В противном случае необходимо выбрать двигатель большей мощности и повторить все расчеты.

Необходимо помнить, что правильно выбранный двигатель по мощности может быть непригоден для использования в приводе, если его перегрузочная способность неудовлетворительна. Проверка двигателя по

допустимой перегрузке, например, в методе эквивалентного тока производится по выражению

$$I_{MAX}/I_{НОМ} \leq \lambda_i,$$

где λ_i – допустимый коэффициент перегрузки двигателя по току.

Если последнее условие не выполняется, следует выбрать по каталогу двигатель большей мощности и проверить его только по перегрузочной способности.

Отметим, что задача выбора двигателя существенно упрощается, если характеристики нагрузки определены в виде детерминированных аналитических выражений.

Описанный выбор двигателя и передаточного числа редуктора при заданных или рассчитанных значениях мощности обеспечивает работу привода с точки зрения энергетики. Следующим этапом является анализ и синтез системы автоматического регулирования, в которой используется привод, для обеспечения требуемых точностных характеристик.

При выборе шагового двигателя проблемы обеспечения требуемого теплового режима не возникает, так как они рассчитываются на длительный режим отработки импульсов заданной частоты. Особое значение приобретает проверка по перегрузкам, которая сводится к такому их выбору, чтобы динамический движущий момент M_d на заданной частоте был не меньше максимального момента нагрузки M_{MAX} , приведенного к валу двигателя,

$$M_d \geq M_{MAX} / i_p \eta. \quad (5.12)$$

Этим условием обеспечивается работа двигателя без пропуска хотя бы одного импульса.

Второе условие состоит в обеспечении максимальной требуемой скорости Ω_{MAX} . Полагая, что частота импульсов f_u и шаг $\alpha_{ш}$ известны, необходимо, чтобы

$$f_u \alpha_{ш} \geq \Omega_{max} i_p. \quad (5.13)$$

Условия (5.12) и (5.13) в совокупности определяют требование по мощности

$$P_{дв} \geq M_{MAX} \Omega_{MAX} / \eta. \quad (5.14)$$

Третье условие составляет требование к точности: необходимо, чтобы один шаг шагового двигателя, приведенный к валу нагрузки, не превышал допустимую ошибку рассогласования $\delta_{ш}$, то есть

$$I_p \geq \alpha_{ш} / \delta_{ш}.$$

Величина $\delta_{ш}$ определяется требованиями к точности установки нулевого положения и отработки угла поворота вала привода.

Приложения

П.1. Обозначения электрических двигателей на электросхемах

В соответствии со стандартом СТ СЭВ 655-71 устанавливаются три способа построения условных графических обозначений электрических двигателей:



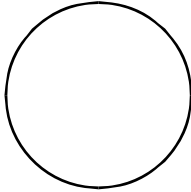
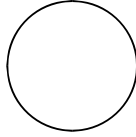
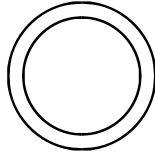
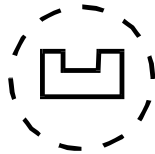
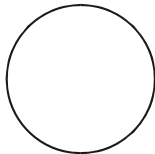
упрощенный однолинейный;

упрощенный многолинейный (форма 1);

развернутый (форма 2).

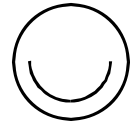
В таблице П.1.1 приведены обозначения некоторых элементов двигателей.

Таблица П.1.1.

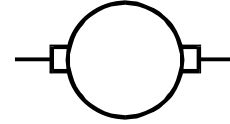
Наименование	Обозначение
1. Обмотка статора (каждой фазы) двигателя переменного тока, обмотка последовательного возбуждения двигателя постоянного тока	
2. Обмотка параллельного возбуждения машины постоянного тока, обмотка независимого возбуждения	
3. Статор. Общее обозначение	
3. Ротор. Общее обозначение	
4. Ротор без обмотки:	
а) полый немагнитный или ферромагнитный	
б) явнополюсный с постоянными магнитами	
5. Ротор с распределенной короткозамкнутой обмоткой (беличья клетка)	

Продолжение таблицы П.1.1.

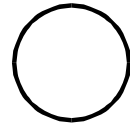
5. Ротор внешний с короткозамкнутой распределенной обмоткой (например, гидродвигателя)



6. Ротор с обмоткой, коллектором и щетками

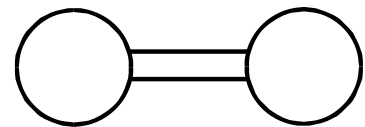


7. Машина электрическая. Общее обозначение



Примечание. Внутри окружности допускается указывать следующие данные: а) род машин (двигатель – М, генератор – G); б) род тока, число фаз или вид соединения обмоток.

8. Машины, соединенные механически



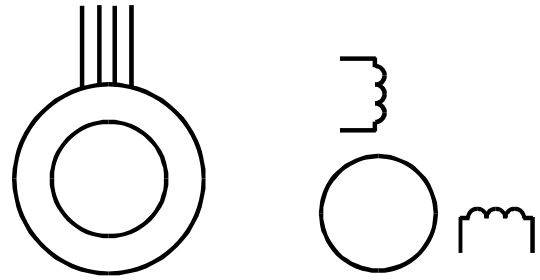
Примеры построения обозначений некоторых электрических двигателей приведены в таблице П1.2.

Таблица П1.2.

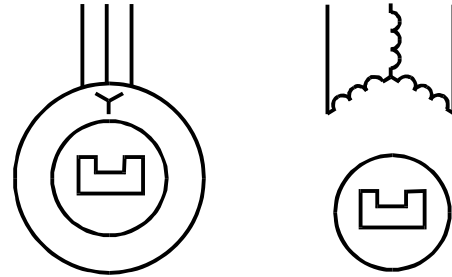
Наименование	Обозначение	
	Форма 1	Форма 2
1. Двигатель асинхронный трехфазный с шестью выведенными концами фаз обмотки статора и с короткозамкнутым ротором		
2. Двигатель асинхронный трехфазный с внешним ротором (например, гидромотор); обмотка статора соединена в звезду		

Продолжение таблицы П.1.2.

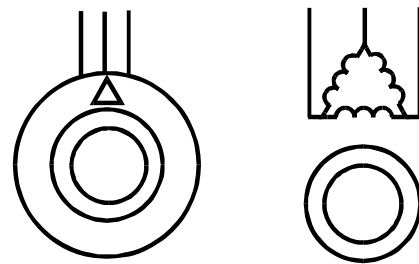
3. Двигатель асинхронный двухфазный с короткозамкнутым ротором (беличья клетка)



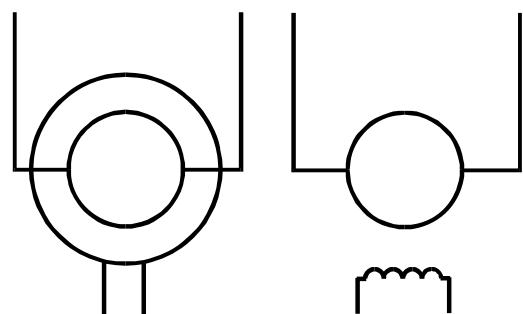
4. Двигатель синхронный трехфазный с возбуждением от постоянных магнитов; обмотка статора соединена в звезду



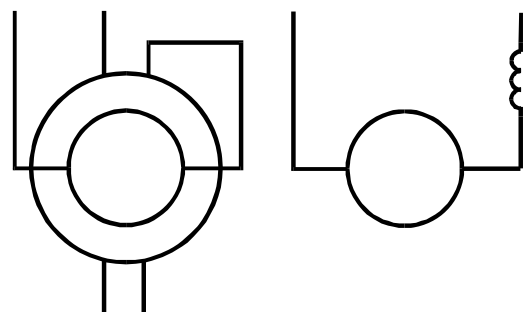
5. Реактивный синхронный двигатель



6. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением



7. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением



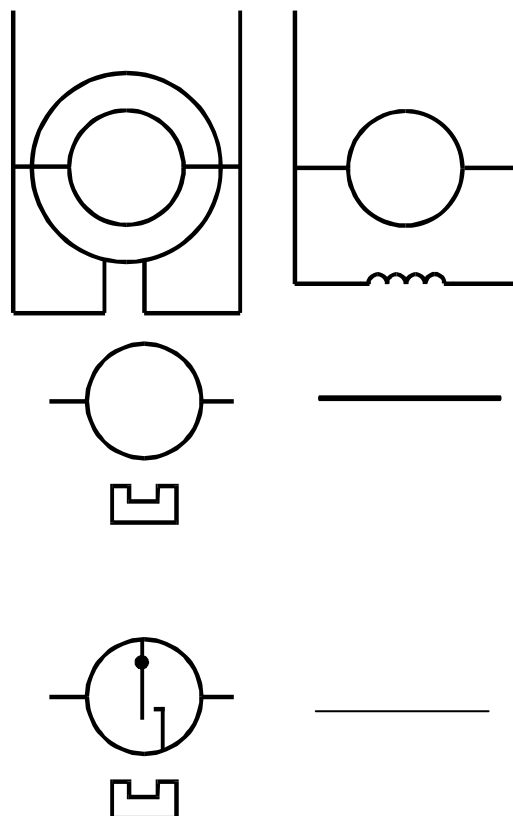
Продолжение таблицы П.1.2.

8. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением

Продолжение таблицы П.1.2.

Двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов

10. Двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и центробежным вибрационным стабилизатором скорости вращения



II.2. Технические данные гидродвигателей

Таблица II.2.1

№п/п	Кинетический момент (гсмс)	Тип ГМ	Питание	Пусковой ток (А)	Рабочий ток (А)	Время разгона (с)	Потребл. Мощность (Вт)	Полное число оборотов (об/мин)	Вес ГМ (г)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	18 20	ГМС-0.057	36В, 400Гц 40В, 500Гц	0.18	0.16	4	6	8000 10000	30
2	25	ГМС-0.025К	36В±10%, 400Гц	0.15	0.12	10	4	24000	25
3	25	ГМС-0.025А	36В, 400Гц	0.15	0.14	10	3	12000	35
4	25	ГМС-0.025КА	36В, 400Гц	0.15	0.14	10	5	24000	19.5
5	25	ГМС-25	36В, 400Гц	0.15	0.03	20	4	24000	25
6	34	ГМС-Т	8В, 1200Гц	0.65	0.4	60	5	36000	35
7	50 62.5	ГМС-0.05	36В, 400Гц 40В, 500Гц	0.25 0.3	0.2 0.25	30	6 7	24000 30000	35
8		ГМС-0.05Г	36В, 400Гц 40В, 500Гц	0.19	0.16	20	6	8000 10000	30
9	53	ГС-0.08(ОП)	36В, 400Гц	0.135	0.12	8	7	24000	42
10	75	ГСП	40В, 500Гц	0.16	0.15	45	4	15000	40
11	100	ГМСК-100	36В, 400Гц	0.35	0.3	30	12	24000	63
12	100	ГМС-0.1	36В, 400Гц	0.18	0.15	60	6	24000	55
13	100	ГМС-0.1(067)	36В, 400Гц	0.15	0.13	45	3.6	24000	52
14	100	ГС-0.1Д	36В, 400Гц	0.35	0.3	30	7	24000	63
15	120	ГМСК-120	36В, 400Гц	0.3	0.25	30	7	24000	67
16	200	ГМС-200	40В, 500Гц	0.3	0.25	60	5	30000	65
17	200	ГМС-02Мвар1	36В, 400Гц	0.35	0.3	45	7	24000	68
18	200	ГМС-0.2М вар 4	36В, 400Гц 40В, 500Гц	0.35 0.4	-----	45 50	7 10	-----	-----
19	200	ГМС-0.2М	36В, 400Гц	0.35	0.3	45	7	24000	65
20	200	ГС-0.2(ОП)	36В, 400Гц	0.22	0.21	60	6	24000	70

Продолжение таблицы П.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21	500	ГМС-0.5	36В, 400Гц	0.5	0.4	90	6	24000	130
22	1000	ГМС-1	36В, 400Гц	0.5	0.4	180	9	24000	800
23	1010	ГМ из ГПК	пневматич. возд. Перепад 90мм.рт.ст.			10		12000	500
24	7500	ГМС-7.5/12	180В, 400Гц	0.2	0.15	120	18	12000	1800
25	8000	ГМ из УП	пневматич. возд. перепад 50мм.рт.ст.			25		8000	250
26	80000	ГМ из АП-5	27В пост.	1	0.7	600	25	8000	4500
27	10	ГМ-0.66(ОП)	14В, 400Гц	0.046	0.042	10	1	20000	14
28	20	ГМ-0.05(ОП)	14В, 400Гц	0.145	0.1	8	1.4	22000	26
29	120	ГТ-2св-В	40В, 1000Гц	0.36	0.34	50	14	30000	50
30	200	ГМА-0.2	36В, 400Гц	0.25	0.14	35	6	21500	65
	250		40В, 500Гц	0.3	0.15	45	7	26000	
31	200	ГМА-0.2М	36В, 400Гц	0.4	0.16	45	6	21500	80
32	200	ГМА-0.2 вар Г	85В, 1000Гц	0.45	0.15	30	14	50000	65
33	200	ГМА-0.2 вар А	36В, 400Гц	0.25	0.14	35	6	21500	65
34	200	ГМА-0.2 вар Б	40В, 500Гц	0.3	0.15	45	7	26000	65
35	200	ГМА-0.2 вар В	36В, 400Гц	0.3	0.14	35	6	20500	65
36	250	ГМА-0.25	40В, 500Гц	0.3	0.16	60	7	27000	65
37	400	ГМА-0.4Г	36В, 400Гц	0.4	0.16	40	6	21500	120
	500		40В, 500Гц	0.45	0.17	50	8	26600	
38	400	ГМА-0.4ГМ	36В, 400Гц	0.55	0.2	50	7	21000	120
	500		40В, 500Гц	0.6	0.25	60	10	26000	

Продолжение таблицы П.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
39	400	ГМА-0.4ТМ вар А	36В, 400Гц	0.45	0.25	40	7	21500	90
40	400	ГМ-0.2Т(ОП)	36В, 400Гц	0.21	0.08	30	3	22200	117
41	500	М-073(ОП)	36В, 400Гц	0.45	0.19	25	6	22500	117
42	500	ГМА-0.5	36В, 400Гц	0.5	0.17	40	6.5	21500	200
	600		40В, 500Гц	0.6	0.18	60	10	25500	
43	500	ГМА-500	36В, 400Гц	0.6	0.11	30	6	22000	120
44	500	ГМ-05(«073»)	36В, 400Гц	0.5	0.15	40	4	21500	122
45	500	ГМА-0.5ПТ	36В, 1000Гц	1	0.25	120	10	54000	120
46	500	ГМА-0.5ПМ	36В, 1000Гц	1.3	0.35	60	14	52000	120
47	500	ГМ-05(«073») вар А	36В, 400Гц	0.55	0.2	40	8	21500	180
48	500	ГМ-05(«073») вар Б	40В, 500Гц	0.6	0.2	120	10	25500	180
49	940	ГА-4/30г	36В, 500Гц	0.5	0.2	120	10	30000	150
50	1000	ГМ-1(ОП)	36В, 400Гц	0.48	0.18	50	6	21600	190
51	1000	ГМ-05«073» (ОП)	85В, 1000Гц	0.73	0.3	50	16	56000	122
52	1000	ГМА-7-01«А»	36В, 400Гц	0.6	0.24	120	7	19000	200
53	1000	ГМА-7-01«В»	36В, 400Гц	0.6	0.2	120	7	19000	200
54	1000	ГМА-1	36В, 400Гц	0.55	0.18	100	7	21000	200
55	1000	ГМА-1ПМ	36В, 1000Гц	1	0.3	120	15	50000	120
56	1250	ГМА-7-01«Б»	36В, 1000Гц	0.95	0.5	90	25	26000	200
57	1500	ГМ-1500	36В, 400Гц	1.6	0.35	40	11	22500	275
58	1800	ГУА-1800	36В, 400Гц	0.5	0.16	210	4	11000	670
65	2000	ГМ-2Т(ОП)	36В, 400Гц	0.7	0.29	75	8	22000	320
59	2000	ГМ-2(ОП)	85В, 1000Гц	0.7	0.22	120	25	55000	190
60	2000	ГМ-2Д	36В, 400Гц	0.35	0.12	210	3.5	10500	500
61	2000	Г-5	36В, 400Гц	0.8	0.2	60	10	30000	250
62	2000	ГУС-2000	208В, 400Гц	0.1	0.08	180	8	24000	710
63	2000	ГМА-2ТМ	36В, 400Гц	0.75	0.25	105	10	21000	300
64	2000	ГМА-2	36В, 400Гц	0.9	0.35	105	10	21500	320
	2500		40В, 500Гц	1.2	0.4	120	12	26000	

Продолжение таблицы П.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
65	2500	ГМА-2.5	85В, 1000Гц	1.2	0.35	60	19	53000	300
66	2500	ГМА-2.5-1	85В, 1000Гц	0.9	0.3	100	30	54000	220
67	2500	ГМА-2Т-1	85В, 1000Гц	1.2	0.45	50	20	54000	390
68	2500	ГМА-2.5(074)	85В, 1000Гц	0.7	0.2	180	12.5	53000	300
69	3000	Указатель поворота Г-1	36В, 500Гц	1	0.25	60	15	30000	350
70	4000	СГМ-4	36В, 400Гц	1.1	0.25	75	8	21500	430
71	4000	ГМА-4	36В, 400Гц	1.5	0.35	150	20	21500	450
	5000		40В, 500Гц			180	25	26000	
72	4000	ГМА-4П-1	36В, 400Гц	4.5	0.5	120	20	56000	300
			40В, 500Гц	5.5	0.6	180	25		
73	4000	ГМА-4П	36В, 400 Гц	1.5	0.32	170	20	21000	450
74	4000	ГМА-4АБ	36В 400Гц	2	0.42	120	25	21500	450
	5000		40В500Гц			180	30	26000	
75	4000	ГМА-4П10	36В 400Гц	1.5	0.29	105	15	21500	450
76	4000	ГМА-4Т-1	85В 1000Гц	1,4	0,42	120	43	53000	350
77	4000	ГМА-4У вар"Б"	36 В 400Гц	1,5	0,35	105	25	21500	400
78	4000	ГМА-4П (359)	36 В 400Гц	1,5	0,29	105	15	21500	450
79	4000	ГМА-4 (078)	36В 400Гц	1,5	0,35	120	20 вар"А"	21500	450
							25 вар"Б"		
80	4000	ГМБ-524	36В 400Гц	1,2	0,3	120	8	22800	800
81	4000	ГМ-4	36В 400Гц	1,5	0,4	60	20	21500	500
82	4000	ГУА-4У	36В 400Гц	1,5	0,3		15	21000	450
83	4000	ГМ-701 "В"	36В 400Гц	0,6	0,25			19000	200
84	4000	ГУ-4П	36В 400Гц	1,5	0,45			22500	
85	5000	ГМ-2Т (ОП)	85В 1000Гц	1	0,3	150	34	52000	320

Продолжение таблицы П.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
86	5600	ГМА-5.6	36В 400Гц	1,5	0,35	180	20	21000	600
87	5650	ГМ из ЭГПК	120В 350Гц	1,5	0,4	120	35	18000	650
88	6000	ГМА-6	36В 400Гц	2	0,4	180	15	21000	650
89	10000	ГМ-10(ОП)	36В 400Гц	2	0,52	210	23	22200	820
90	10000	ГМА-10	36В 400Гц	3	0,7	270	22	21500	940
91	10000	ГУА-10М	115В 400Гц	0,5	0,08	420(115) 120(190)	9	21000	1000
92	10000	ГМК-10В(313)	36В 400 Гц	0,82	0,14	420	5	21000	1100
93	10000	ГМ-10000	36В 400Гц	3	0,6	120	20	22500	1000
94	10000	ГУА-10МА-1	115В 400Гц	0,65	0,09	300	8,5	19000	
95	10000	ГУА-10У							
96	12000	ГА-7/30	36В 500Гц	2,5	0,7	300	20	30000	700
97	18200	ГУА-1800	36В 400Гц	2,5	0,36	300	8	22000	1000
98	12250	ГМ ТОС	40В 333Гц	2	0,6	240	20	18000	1980
99	20000	ГУА-2Д	36В 400 Гц	0,35	0,12	230	3,5	10500	640
100	23000	ГМ ГК "Гиря"	120В 500 Гц	1,5	0,8	900	25	23600	4000
101	24000	ГУА-25000	36В 400Гц	2,5	0,6	480	12	22000	2000
102	62000	Г-10/30	36В 500Гц	5	1	600	30	30000	4000
103	100000	ГМА-100	36В 400Гц	3,5	0,6	720	25	22500	4500
104	110000	ГМ ГК "Курс"	120В 330Гц	5	0,8	1500	25	20000	25000
105	110000	ГМ ГК "Градус"	110В 500Гц	5	1	1800	30	14600	4500
106	130000	ГМ ГК "Курс-3"	120В 330 Гц	5	1	1500	30	18000	3500
107	134000	ГМ ГК "Курс-2"	120В 330 Гц	5	1	1800	30	18000	4500
108	135000	ГМ ГК "Курс-1"	120В 330Гц	5	1	1200	30	18000	4000
109	145000	Г-13	120В 330 Гц	6	1	1500	40	20000	15000
110	350000	ГМ "Шар"	70В 700Гц	8	2	1800	50	10200	15000
111	500000	ГМ "Янтарь-2Н"	70В 229Гц	10	2	2400	100	12800	9000
112	1350000	ГМ ГУ-1	90В 150 Гц	25	5	6000	300	6000	30000

П.3. Технические данные двигателей малой мощности для систем автоматики

П.3.1. Силовые асинхронные двигатели

П.3.1.1. Двигатели серии ДА.

Трехфазные (ДАТ) и однофазные (ДАО) двигатели этой серии отличаются повышенной точностью изготовления и высоким качеством электромагнитных, конструкционных и изоляционных материалов. Режим работы продолжительный или повторно-кратковременный.

Условия эксплуатации двигателей серии ДА:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц	1...200
ускорение, м/с ²	100
Ударные нагрузки, м/с ²	400
Температура окружающей среды, °С	- 60...+100
Относительная влажность воздуха при температуре 35 ⁰ С	98
Гарантийная наработка, час	
на 400 Гц	5000
на 50 Гц	10000

Таблица П.3.1. Технические данные двигателей серии ДА на частоту питания (400±20) Гц

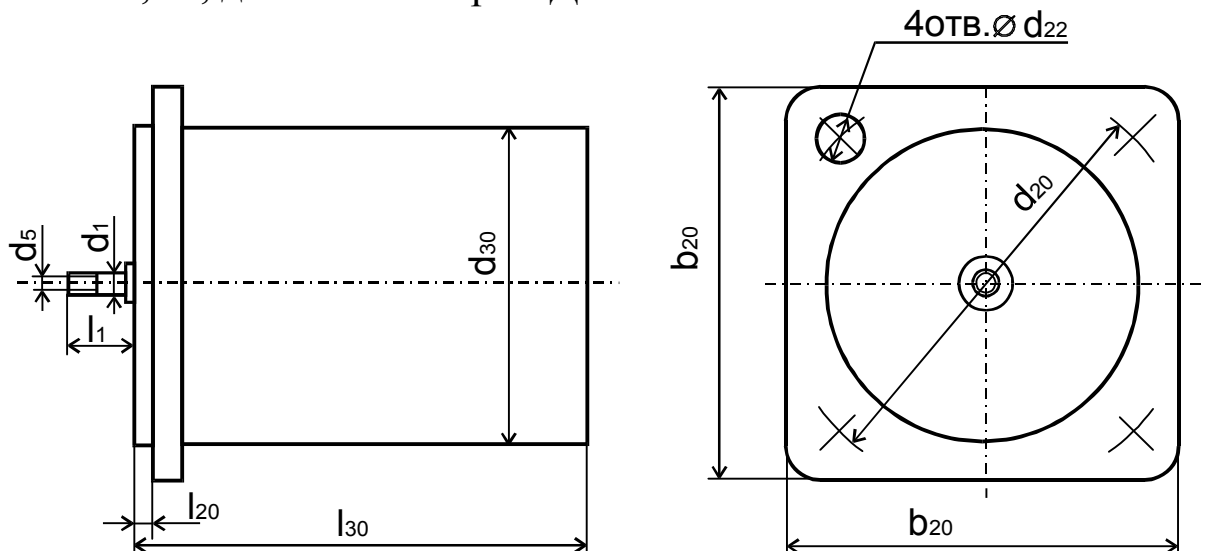
Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} /M _П , гсм	I _{НОМ} /I _П , А	Кпд, %	J _P , гсм ²
ДАТ 11411	36	1,6	4800	33/49	0,45/0,6	13	6
ДАТ 21411	36	6	5000	235/294	0,8/1,6	30	20
ДАТ 21571	220	10	7000	235/294	0,15/0,3	44	20
ДАТ 21670	220	25	10700	226/430	0,2/0,62	65	20
ДАТ 22660	200	40	10600	373/568	0,35/1,4	56	30
ДАТ 31461	200	16	5000	294/490	0,25/0,6	45	55
ДАТ 32461	200	25	5100	490/784	0,4/1	50	90
ДАО 32641	115	60	11000	540/880	0,95/4,2	76	90
ДАО 42441	115	40	5400	735/1570	1,0/3,5	56	270
ДАТ 42561	200	90	7000	1200/2540	0,85/3,5	65	270
ДАТ 42671	220	180	10800	1620/3620	1,1/5	76	270
ДАТ 52461	200	120	5100	2260/3620	1,1/3,2	65	770
ДАТ 53671	220	370	11400	3240/5400	1,7/12	80	810
ДАТ 61560	200	370	7400	4900/14700	3,1/17	50	1800

Таблица П.3.2. Технические данные двигателей серии ДА на частоту питания (50 ± 1) Гц (режим работы – продолжительный)

Тип двигателя	U, В	P _{2Н} , Вт	n _{ном} , об/мин	M _{ном} /M _п , гсм	I _{ном} /I _п , А	Кпд, %	C _р , мкф	C _п , мкф
ДАТ 1271	220	6	2600	236/422	0,16/0,3	25	1,2	1,8
ДАТ 32271	220	10	2600	372/745	0,18/0,4	39	1,2	-
ДАТ 42271	220	25	2700	980/1760	0,2/0,8	52	2,2	-
ДАТ 51271	220	40	2700	1470/3400	0,3/1,2	58	3,3	-
ДАТ 53271	220	90	2700	3240/8140	0,6/2,7	68	4,7	-
ДАТ 53172	220	60	1280	4600/7350	0,55/1,5	58	6,8	15
ДАТ 53182	380	60	1280	4600/7350	0,32/0,9	58	6,8	15

Примечание. Данные приведены для случая соединения обмоток двигателя в звезду. В таблице обозначено: C_р – рабочая емкость, C_п – пусковая емкость.

Таблица П.3.3. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса, кг, двигателей серии ДА



Тип двигателя	d ₁	d ₅	d ₃₀	d ₂₀	d ₂₂	l ₁	l ₂₀	l ₃₀	b ₂₀	Масса
ДАТ11411	3	M3	32	40	3,4	10	2	66	37	0,115
ДАТ21411	4	M3	40	50	4,5	12	2,5	84	47	0,26
ДАТ21571	4	M3	40	50	4,5	12	2,5	84	47	0,26
ДАТ21670	4	M3	40	50	4,5	12	2,5	84	47	0,26
ДАТ22660	4	M3	40	50	4,5	12	2,5	84	47	0,26
ДАТ31461	5	M4	50	60	4,5	14	2,5	102	56	0,58
ДАТ32461	5	M4	50	60	4,5	14	2,5	102	56	0,58
ДАО32641	5	M4	50	60	4,5	14	2,5	102	56	0,58
ДАО42441	6	M4	60	75	5,8	16	2,5	118	66	1
ДАТ42561	6	M4	60	75	5,8	16	2,5	118	66	1
ДАТ42671	6	M4	60	75	5,8	16	2,5	118	66	1
ДАТ52461	8	M6x0,5	80	100	7	20	3	126	86	1,7

Продолжение таблицы П.3.3.

Тип двигателя	d ₁	d ₅	d ₃₀	d ₂₀	d ₂₂	l ₁	l ₂₀	l ₃₀	b ₂₀	Масса
ДАТ53671	8	M6x0,5	80	100	7	20	3	144	86	1,7
ДАТ61560	9	M6x0,5	100	115	10	20	3	150	106	2,2

П.3.1.2. Двигатели серии УАД.

Двигатели выпускаются с одним или двумя выходными концами вала, с фланцевым креплением и креплением по корпусу. Режим работы – продолжительный.

Условия эксплуатации двигателей серии УАД:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц 5...300

ускорение, м/с² 50

Ударные нагрузки, м/с² 400

Температура окружающей среды, °С - 60...+80

Отн. влажн. воздуха при температуре 35°С 98

Гарантийная наработка, час 3000

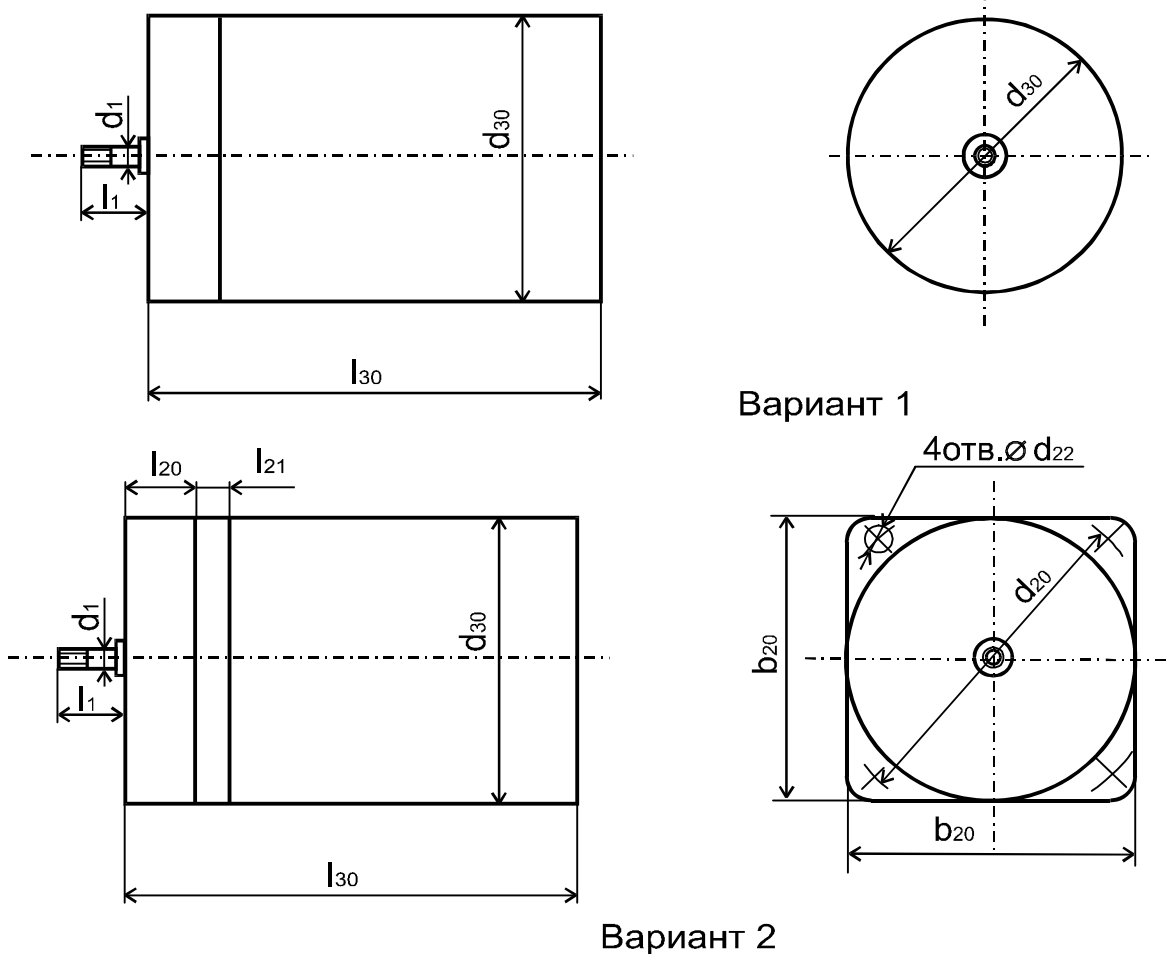
Таблица П.3.4. Технические данные двигателей серии УАД, работающих в трехфазном режиме. Напряжение питания 220 В, 50 Гц.

Тип двигателя	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} /M _П , гсм	I _{НОМ} /I _П , А	Кпд, %
УАД 12	1,5	2760	52/129	0,06/0,11	14
УАД 22	4	2760	138/207	0,1/0,2	22
УАД 32	7	2760	242/486	0,11/0,28	30
УАД 42	13	2760	450/900	0,16/0,52	45
УАД 52	20	2760	690/1380	0,18/0,81	51
УАД 62	40	2760	1385/2080	0,25/1,5	60
УАД 72	70	2760	2420/3630	0,4/2,7	65
УАД 24	1,2	1330	86/129	0,05/0,08	9
УАД 34	2,5	1330	184/276	0,11/0,16	11
УАД 44	6	1340	433/650	0,13/0,28	20
УАД 54	9	1340	649/970	0,17/0,43	25
УАД 64	20	1340	1448/2160	0,25/0,76	40
УАД 74	30	1340	2160/3240	0,3/1,1	50

Таблица П.3.5. Технические данные двигателей серии УАД, работающих в однофазном режиме. Напряжение питания 220 В, 50 Гц.

Тип двигателя	$P_{2НОМ}$, Вт	$n_{НОМ}$, об/мин	$M_{НОМ}/M_{П}$, ГСМ	$M_{МАХ}$, ГСМ	$I_{НОМ}/I_{П}$, А	КПД, %	C_p , мкф
УАД 12	1	2800	34/17	68	0,055/0,11	10	0,5
УАД 22	3	2800	100/52	208	0,085/0,17	17	1
УАД 32	5	2800	170/51	255	0,11/0,28	23	1,5
УАД 42	10	2800	340/100	510	0,13/0,42	44	1,5
УАД 52	18	2800	610/184	920	0,19/0,67	50	2
УАД 62	30	2800	1020/208	1560	0,32/1,2	51	4
УАД 72	50	2800	1700/170	2550	0,42/2,1	60	5
УАД 24	1	2320	72/35	108	0,055/0,08	9	0,5
УАД 34	2	1320	144/72	216	0,1/0,15	11	1
УАД 44	4	1340	286/143	428	0,14/0,21	14	2
УАД 54	8	1340	576/285	855	0,16/0,32	25	2
УАД 64	15	1340	1070/321	1600	0,23/0,58	35	3
УАД 74	25	1340	1780/356	2670	0,3/0,9	45	4

Таблица П.3.6. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса, кг, двигателей серии УАД



Продолжение таблицы П.3.6.

Тип двигателя	d ₁	d ₃₀	d ₂₀	d ₂₂	l ₁	l ₂₀	l ₂₁	l ₃₀	b ₂₀	Масса
УАД 12	2,5	40	14	2,9	11,5	15,5	2,5	58	40	0,28
УАД 22	4	50	20	3,4	18	18,5	3	60	50	0,46
УАД 32	4	50	20	3,4	18	18,5	3	70	50	0,56
УАД 42	5	62	24,5	4,5	23	20	3	75	62	0,87
УАД 52	5	62	24,5	4,5	23	20	4	88	62	1,12
УАД 62	6	75	28	5,5	27,5	25	5	95	75	1,59
УАД 72	6	75	28	5,5	27,5	25	5	115	75	2,12
УАД 24	4	50	20	3,4	18	18,5	3	60	50	0,46
УАД 34	4	50	20	3,4	18	18,5	3	70	50	0,56
УАД 44	5	62	24,5	4,5	23	20	3	75	62	0,87
УАД 54	5	62	24,5	4,5	23	20	4	88	62	1,12
УАД 64	6	75	28	5,5	27,5	25	5	95	75	1,54
УАД 74	6	75	28	5,5	27,5	25		115	75	2,02

П.3.1.3. Двигатели серии ДАТ.

Двигатели ДАТ – трехфазные. Крепление двигателя – фланцевое. Режим работы – продолжительный. Напряжение питания 220 В, 400 Гц.

Условия эксплуатации двигателей серии ДАТ:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц

5...1000

ускорение, м/с²

100

Ударные нагрузки, м/с²

750

Температура окружающей среды, °С

- 60...+100

Отн. влажн. воздуха при температуре 35°С

98

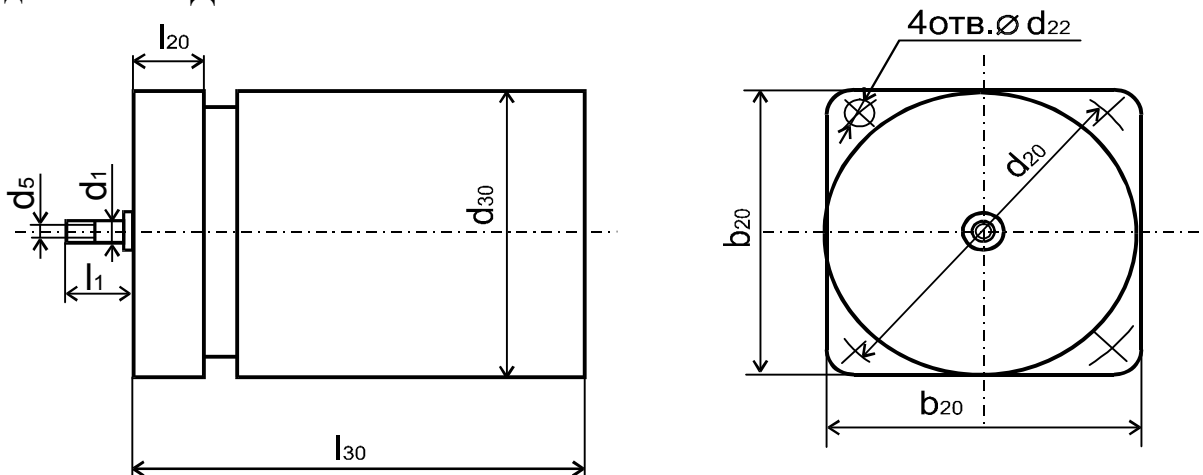
Гарантийная наработка, час

5000

Таблица П.3.7. Технические данные двигателей серии ДАТ

Тип двигателя	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} /M _П , гсм	M _{МАХ} , гсм	I _{НОМ} /I _П , А	Кпд, %	j _p , гсм ²
ДАТ 10-12	10	10800	88/147	196	0,16/0,38	25	7,3
ДАТ 16-12	16	10700	142/205	294	0,25/0,7	35	31,4
ДАТ 100-8	100	7350	1320/1860	2540	1/3	65	345
ДАТ 100-6	100	5400	1770/2540	3920	1,2/4,5	60	910
ДАТ 250-8	250	7550	3180/4500	6360	1,7/7,5	65	1110
ДАТ 400-8	400	7500	5100/7000	9800	2,5//13	75	3140
ДАТ 112-120	120	4000	2700/4400	6800	0,97/3,1	58	1800

Таблица П.3.8. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса, кг, двигателей ДАТ



Тип двигателя	d_1	d_5	d_{20}	d_{22}	d_{30}	l_1	l_{20}	l_{30}	b_{20}	Масса
ДАТ 16-12	4	-	48	3,5	40	10	3	75	41	0,3
ДАТ 100-8	7	M6	70	5,5	60	20	3	122	61	1
ДАТ 100-6	8	M6	92	6,5	80	22	3	136	81	1,7
ДАТ 250-8	8	M6	92	6,5	80	22	3	153	81	2,2
ДАТ 400-8	11	M8	120	8,5	100	26	4	178	101	3,8

П.3.2. Управляемые асинхронные двигатели

П.3.2.1. Двигатели серии ДКИ.

Серия четырехполюсных двухфазных двигателей с ротором БК. Крепление двигателей – фланцевое или торцевое. Режим работы – продолжительный. Для двигателей мощностью более 10 Вт допускается работа при реверсе с частотой не более 0,25 Гц.

Расшифровка условного обозначения: Д – двигатель, К – с короткозамкнутым ротором, И – исполнительный, первая цифра – максимальная мощность на валу двигателя, вторая цифра – синхронная скорость вращения, тыс. об/мин, ТВ – тепловлагодостойкие.

Напряжение питания обмотки возбуждения:

ДКИ-0,6-12ТВ 36 В, 400 Гц
 остальных типов 115 В, 400 Гц.

Напряжение питания обмотки управления:

двигателей мощностью до 10 Вт 36 В, 400 Гц,
 двигателей мощностью более 10 Вт 80 В, 400 Гц.

Условия эксплуатации двигателей серии ДКИ:

Вибрационные нагрузки:

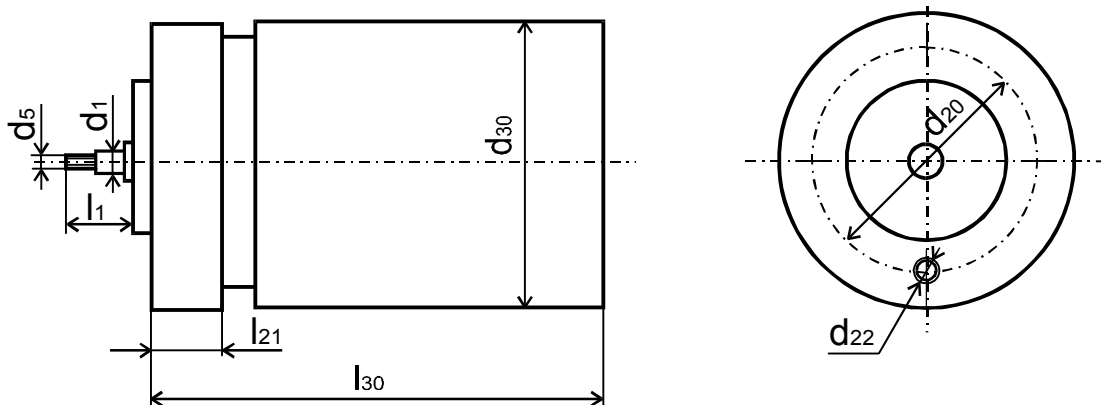
диапазон частот, Гц 5...1000
 ускорение, m/c^2 100

Ударные нагрузки, m/c^2	120
Температура окружающей среды, $^{\circ}C$:	
мощностью до 10 Вт	-60...+85
мощностью более 10 Вт	-60...+70
Отн. влажн. воздуха при температуре $35^{\circ}C$	98
Гарантийная наработка, час:	
мощностью до 10 Вт	3000
мощностью более 10 Вт	1000

Таблица П.3.9. Технические данные двигателей серии ДКИ

Тип двигателя	$P_{2НОМ}$, Вт	$n_{НОМ}$, об/мин	$M_{П}$, гсм	$I_{ОВ}$, А	$I_{ОУ}$, А	τ_M , с	Кпд %	J_P , гсм ²
ДКИ-0,6-12ТВ	0,6	6000	24	0,25	0,15	0,008	15	0,49
ДКИ-1-12ТВ	1	5500	27	0,12	0,22	0,01	12	0,6
ДКИ-2,5-12ТВ	2,5	6000	64	0,15	0,35	0,015	22	1,8
ДКИ-6-12ТВ	6	6750	120	0,3	0,65	0,02	28	6,8
ДКИ-16-12ТВ	16	8000	290	0,4	0,85	0,03	43	19,6
ДКИ-25-12ТВ	25	7000	370	0,45	1,4	0,05	45	49
ДКИ-40-12ТВ	40	9000	540	0,75	1,9	0,15	50	147

Таблица П.3.10. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии ДКИ



Тип двигателя	d_1	d_5	d_{20}	d_{22}	d_{30}	l_1	l_{21}	l_{30}	Масса
ДКИ-0,6-12ТВ	2,8	-	18	M2	25	10	1,6	56	0,075
ДКИ-1-12ТВ	2,8	-	18	M2	25	10	1,6	63	0,1
ДКИ-2,5-12ТВ	2,8	-	22	M3	32	10	2,5	72	0,18
ДКИ-6-12ТВ	3,8	-	28	M4	40	12	2,5	87	0,35
ДКИ-16-12ТВ	4	M3	36	M5	50	12	4	107	0,75
ДКИ-25-12ТВ	6	M4	45	M5	60	16	4	128	1,3
ДКИ-40-12ТВ	7	M4	55	M6	80	16	6	136	2,36

Маркировка обмоток: 1-2 - ОУ₁, 3-4 - ОУ₂, 5-6 - ОВ.

Примечание. Двигатели ДКИ-40-12ТВ и ДКИ-6-1,5 имеют 6 отверстий диаметром d_{22} , остальные типы двигателей - 4 отверстия диаметром d_{22} .

П.3.2.2. Двигатели серии АД.

Двухфазные двигатели серии АД имеют ротор в виде БК. Крепление двигателей – фланцевое или торцевое. Режим работы – продолжительный.

Расшифровка условного обозначения: АД – серия, цифры – диаметр корпуса в мм, буквы А, Б, В, Д – напряжение питания, М – модификация обмотки управления, Р – с редуктором (передаточное число редуктора 1:25).

Буква А соответствует напряжению питания ОВ – 127 В, ОУ – 40 В; буква Б – ОВ – 40 В, ОУ – 40 В, буква В – ОВ – 40 В, ОУ – 24 В, буква Д – ОВ – 127 В, ОУ – 24 В. Частота питания - Гц.

Условия эксплуатации двигателей серии АД:

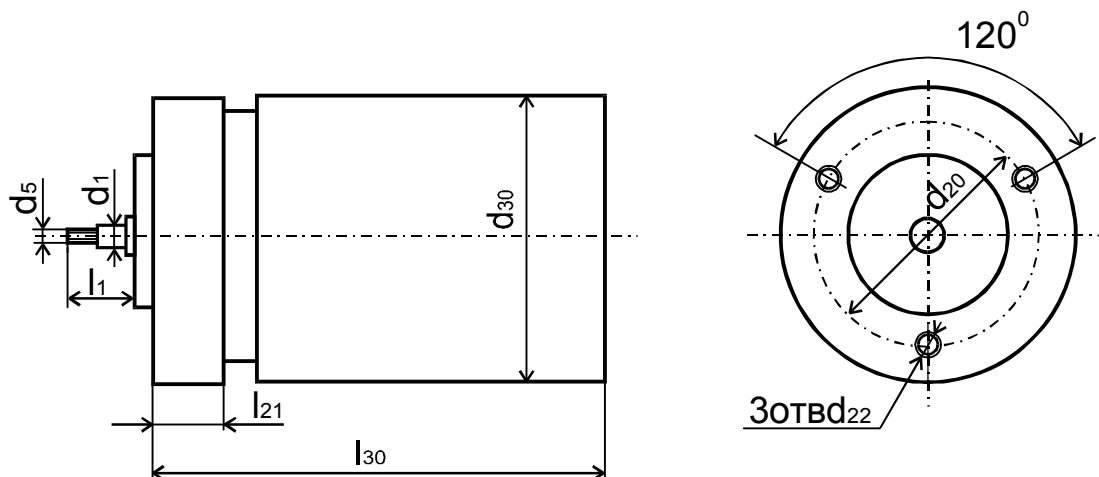
Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц	1...2000
ускорение, м/с^2	150
Ударные нагрузки, м/с^2	750
Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	- 60...+100
Отн. влажн. воздуха при температуре 35°C	98
Гарантийная наработка, час	5000

Таблица П.3.11. Технические данные двигателей серии АД

Тип двигателя	$P_{2\text{НОМ}}$, Вт	$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	$M_{\text{НОМ}}$, ГСМ	$M_{\text{П}}$, ГСМ	$\tau_{\text{М}}$, с	КПД, %	$J_{\text{Р}}$, ГСМ ²
АД-25	1	4000	10	35	0,02	18	1
АД-32	2	4000	18	70	0,01	22	1
АД-50	4	3000	52	210	0,016	20	6

Таблица П.3.12. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии АД (вариант 1)



Продолжение таблицы П.3.12.

Тип двигателя	d ₁	d ₅	d ₂₀	d ₂₂	d ₃₀	l ₁	l ₂₁	l ₃₀	Масса
АД-25	M2,5	3	15	M2	25	8	1,5	49	0,09
АД-32	M2,5	3	26	M2	32	7,5	2	52	0,15
АД-50	M3	3,8	42	M3	50	9,5	2	68,5	0,56

Маркировка обмоток: 1-2 – ОВ; 3-4 – ОУ₁; 5-6 – ОУ₂.

П.3.2.3. Двигатели серии ДМ.

Двухфазные двигатели серии ДМ имеют ротор в виде БК. Крепление двигателей – фланцевое или торцевое. Режим работы – продолжительный. Напряжение питания ОВ – 36 В, ОУ ДМ-0,1 – 18 В, остальных двигателей – 30 В. Частота питания – 400 Гц.

Условия эксплуатации двигателей серии ДМ:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц 10...300

ускорение, м/с²:

ДМ-0,1 70

ДМ-0,4 150

ДМ-1 50

Ударные нагрузки, м/с²:

ДМ-1 120

Остальных типов 150

Температура окружающей среды, °С - 60...+100

Отн. влажн. воздуха при температуре 40°С 98

Гарантийная наработка, час

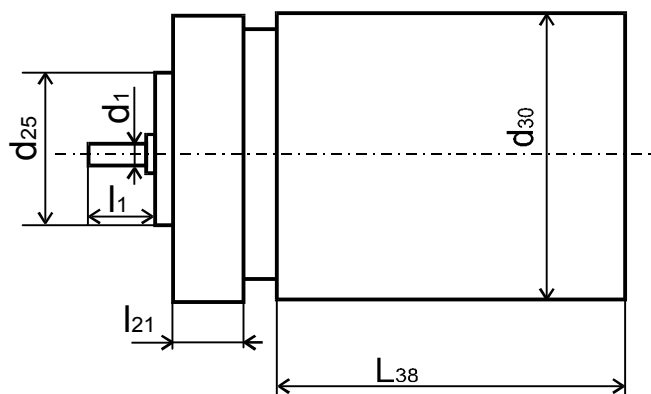
ДМ-1 1000

Остальных типов 3200

Таблица П.3.13. Технические данные двигателей серии ДМ

Тип двигателя	P _{2МАХ} , Вт	n ₀ , об/мин	M _п , гсм	I _{пв} , А	I _{пу} , А	U _{тр} , В	τ _м , с
ДМ-0,1	0,1	8500	6	0,09	0,07	1,3	-
ДМ-0,4	0,4	6000	18	0,125	0,15	1,3	0,024
ДМ-1	1	5500	50	0,24	0,29	1	0,03

Таблица П.3.14. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии ДМ



Тип двигателя	d_1	d_{25}	d_{30}	l_1	l_{21}	l_{38}	Масса
ДМ-0,1А	4,8	12	20	4,52	2	23,4	0,04
ДМ-0,1Б	2,8	12	20	6,32	2	23,4	0,04
ДМ-0,4	4,8	16	25	6,8	2	23,38	0,065
ДМ-1	4,8	20	30	6,4	2	44,88	0,15

Маркировка обмоток: 1-3 – ОВ; 2-5 – ОУ₁; 4-6 – ОУ₂.

П.3.2.4. Двигатели серии ДИД.

Двухфазные двигатели серии ДИД имеют полый немагнитный ротор. Крепление двигателя – фланцевое. Режим работы – продолжительный. Напряжение питания ОВ и ОУ 36 В, 400 Гц, двигателя ДИД – ТЧ – 1000 Гц.

Расшифровка условного обозначения: Д – двигатель, И – индукционный, Д – двухфазный, число – максимальная мощность, ТА – нагревостойкие, ТВ, У – нагревовлажностойкие, ТЧ – нагревостойкие на частоту напряжения питания 1000 Гц.

Условия эксплуатации двигателей серии ДИД (кроме ДИД-ТЧ):

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц 10...1000

ускорение, м/с² 75

Ударные нагрузки, м/с² 120

Температура окружающей среды, °С

ДИД-0,1, ДИД-0,6 -60...+80

Остальных типов -60...+100

Отн. влажн. воздуха при температуре 20°С 98

Гарантийная наработка, час

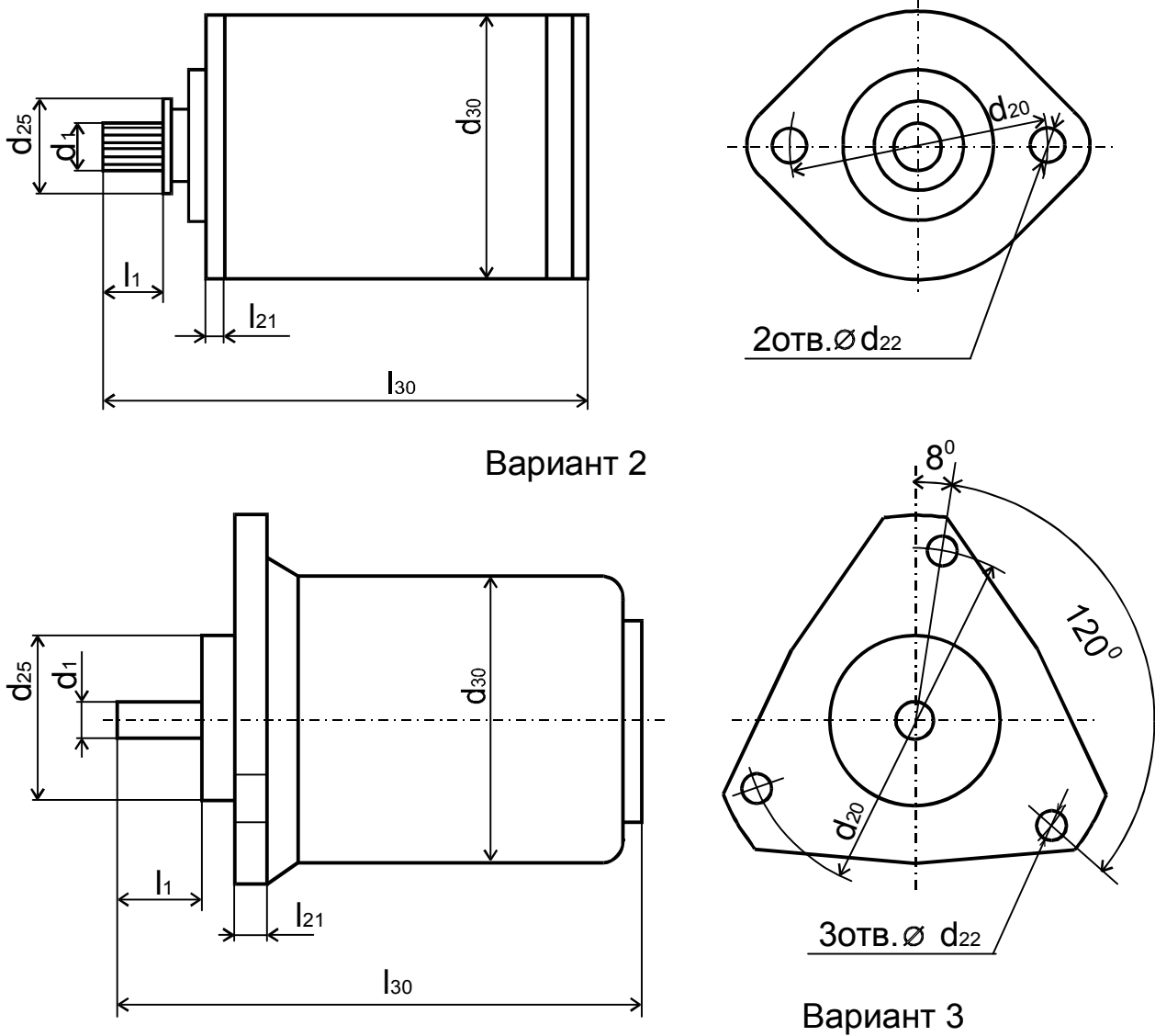
ДИД-0,1 1500

Остальных типов 2200

Таблица П.3.15. Технические данные двигателей серии ДИД

Тип двигателя	$P_{2НОМ}$, Вт	$M_{П}$, гсм	n_0 , об/мин	τ_M , с	$I_{ПВ}$, А	КПД %	J_P , гсм ²
ДИД-0,1	0,1	2,5	12000	0,14	0,08	3	0,03
ДИД-0,5	0,4	6,9	14000	0,11	0,15	8	0,05
ДИД-0,6	0,5	9,8	16000	0,11	0,2	13	1
ДИД-1	1	15,7	18000	0,08	0,25	18	0,08
ДИД-2	2	33,3	18000	0,055	0,4	20	0,09
ДИД-3	3	88,2	8000	0,025	0,7	23	0,25
ДИД-5	5	215,6	6000	0,075	1,2	20	2,5

Таблица П.3.16. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии ДИД



Продолжение таблицы П.3.16.

Тип двигателя	Вар. исп.	d ₁	d ₂₅	d ₂₀	d ₂₂	d ₃₀	l ₁	l ₂₁	l ₃₀	Масса
ДИД-0,1	2	4,2	12	24	2,5	18,7	5,1	2,1	-	0,025
ДИД-0,5	2	4,2	16	27	3	22,2	5,1	2,1	-	0,05
ДИД-0,6	2	4,2	12	31	3	26	5,1	2,1	-	0,06
ДИД-1	3	2,8	20	38,8	3,2	34	9,6	4	10	0,11
ДИД-2	3	2,8	20	38,8	3,2	34	8,8	4	10	0,16
ДИД-3	3	3,8	23	54,6	3,5	49	10	4	12,6	0,36
ДИД-5	3	4,8	32	68	3,5	61	17,5	5,5	10,6	0,72

Маркировка обмоток: 1-3 – ОВ; 4-6 – ОУ₁; 2-5 – ОУ₂.**П.3.2.5. Двигатели серии ЭМ.**

Двухфазные двигатели с полым немагнитным ротором. Крепление двигателей – фланцевое. Режим работы – продолжительный, для двигателей ЭМ 25М – повторно-кратковременный (15 мин работы, 30 мин выключен). Частота напряжения питания 400 Гц; напряжение питания ОВ 115 В.

Условия эксплуатации двигателей серии ЭМ:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц

ЭМ-1МТ, ЭМ-2МТ, ЭМ-2-12А, ЭМ-8-12А 10...300

Для остальных типов

10...200

ускорение, м/с²

50

Ударные нагрузки, м/с²

ЭМ-25

40

Остальных типов

120

Температура окружающей среды, °С

ЭМ-25

-60...+50

ЭМ-1

-60...+60

Остальных типов

-60...+80

Отн. влажн. воздуха при температуре 20°С

98

Гарантийная наработка, час

ЭМ-0,2М

750

ЭМ-25

2125

Остальных типов

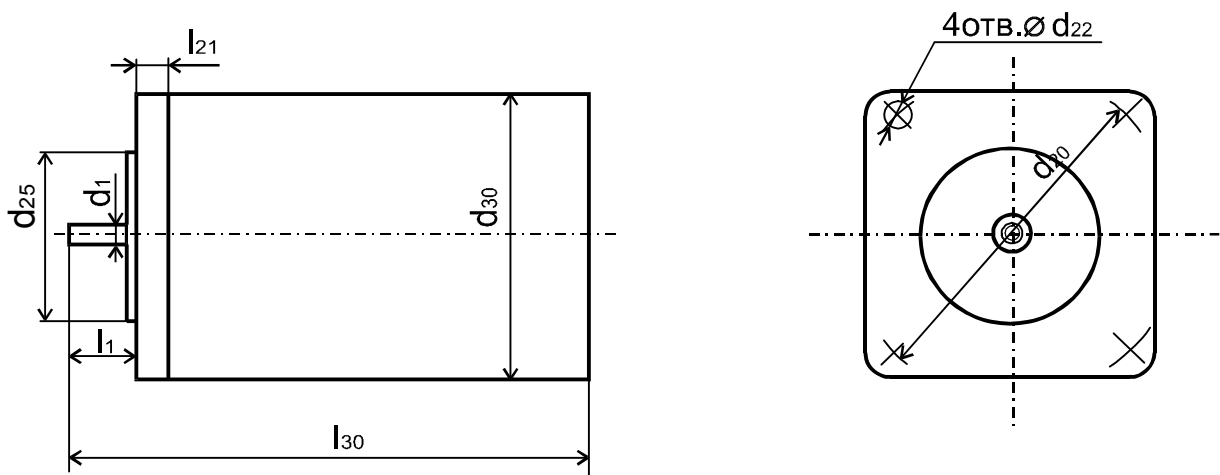
1000

Таблица П.3.17. Технические данные двигателей серии ЭМ

Тип двигателя	U _y , В	P _{2МАХ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , ГСМ	I _{НОМВ} , А	I _{НОМУ} , А	τ _М , с
ЭМ-0,2М	60	0,2	2500	10	0,15	0,2	0,02
ЭМ-0,5М	60	0,5	2000	25	0,2	0,15	0,015
ЭМ-1М	60	1	2500	40	0,25	0,2	0,015
ЭМ-2М	60	2	4000	60	0,3	0,25	0,02
ЭМ-4М	60	4	3300	120	0,45	0,3	0,025

ЭМ-8М	80	8	4000	200	0,5	0,8	0,03
ЭМ-15М	80	15	4000	400	1	0,9	0,035
ЭМ-25М	80	25	4000	580	1,25	1,2	0,04
ЭМ-0,5	115	0,5	2000	20	0,165	0,035	0,025
ЭМ-1	115	1	2000	32	0,25	0,055	0,03
ЭМ-2	115	2	2000	80	0,35	0,11	0,035
ЭМ-4	115	4	2000	180	0,55	0,15	0,08
ЭМ-25	50	25	4000	580	1,3	0,85	0,1
ЭМ-2-12	50	2	5000	45	0,25	0,125	0,04
ЭМ-8-12	50	8	6000	130	0,36	0,25	0,045

Таблица П.3.18. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, двигателей ЭМ



Тип двигателя	d_1	d_{25}	d_{20}	d_{22}	d_{30}	l_1	l_{21}	l_{30}	Масса
ЭМ-0,2М	3	30	45	3,5	38	8	3	61	0,165
ЭМ-0,5М	3	35	50	3,5	42	8	3	69	0,255
ЭМ-1М	3	35	50	3,5	42	8	3	76	0,305
ЭМ-2М	3	40	55	4,5	48	8	3	80	0,408
ЭМ-4М	3	40	64	4,5	55	14	3,2	91	0,557
ЭМ-8М	4	40	75	4,5	65	14	3	97	0,8
ЭМ-15М	6	60	85	4,5	75	18	5	116	1,3
ЭМ-25М	6	60	85	4,5	75	22	5	140	1,67
ЭМ-0,5	3	35	50	3,5	42	12	3	73	0,265
ЭМ-1	3	35	50	3,5	42	12	3	80	0,305
ЭМ-2	3	40	64	4,5	55	12	3	90	0,587
ЭМ-25	6	80	105	4,5	95	22	5	141	2,8
ЭМ-2-12	3	35	50	3,5	42	12	3	80	0,305
ЭМ-8-12	3	40	64	4,5	55	12	3,2	90	0,557

Маркировка обмоток: 1-2 – ОУ; 3-4 – ОВ.

П.3.2.6. Двигатели серии АДП.

Двухфазные двигатели АДП с полым немагнитным ротором. Крепление двигателей – за корпус. Режим работы – продолжительный. Двигатель АДП-1120 снабжен центробежным стабилизатором скорости вращения.

Условия эксплуатации двигателей серии АДП:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц	5...200
ускорение, м/с ²	40
Ударные нагрузки, м/с ²	350
Температура окружающей среды, °С	-50...+85
Отн. влажн. воздуха при температуре 40°С	98

Гарантийная наработка, час:

АДП-1262, АДП-1362, АДП-1563	2000
АДП-1001	200
Остальных типов	1500

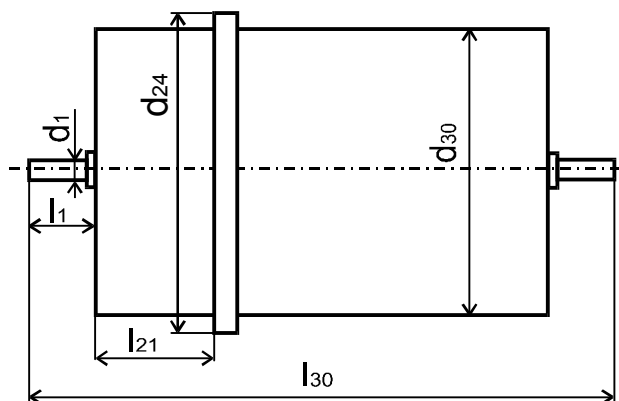
Таблица П.3.19. Технические данные двигателей серии АДП

Тип двигателя	U _В , В	U _У , В	f, Гц	P _{2МАХ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	n ₀ , об/мин	M _П , гсм	M _Н , гсм
АДП-1120	110	110	400	2,4	4000	-	-	58,8
АДП-1121	110	110	400	8,9	6000	10000	167	142
АДП-1123	110	110	400	4,1	4000	6700	137	98
АДП-1001	120	35	500	3,7	9000	12500	54	39
АДП-1262	110	125	50	90	1750	2500	833	490
АДП-1263	36	275	500	24,7	6000	8500	588	392
АДП-1362	110	125	50	17	1950	2500	1666	842
АДП-1363	36	245	500	46,4	6000	8600	833	735
АДП-1563	36	220	500	62	6000	8600	1176	980

Продолжение табл. П.3.19.

Тип двигателя	I _{ПВ} , А	I _{ПУ} , А	I _{НОМВ} , А	I _{НОМУ} , А	τ _М , с	Кпд %
АДП-1120	-	-	-	-	0,087	7,5
АДП-1121	0,22	0,31	0,25	0,27	0,087	22
АДП-1123	0,18	0,28	0,4	0,22	0,064	12
АДП-1001	-	-	0,25	0,38	0,039	-
АДП-1262	-	0,6	0,6	0,25	0,005	17
АДП-1263	-	0,65	0,6	1,6	0,027	27
АДП-1362	-	0,75	0,8	0,6	0,006	23,5
АДП-1363	-	0,95	0,65	2	0,051	35
АДП-1563	-	1,2	0,85	3,4	-	34

Таблица П.3.20. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии АДП



Тип двигателя	d_1	d_{24}	d_{30}	l_1	l_{21}	l_{30}	Масса
АДП-1120	4	55	51	7	52,5	108	-
АДП-1121	4	55	50	6	52,5	90	-
АДП-1123	4	55	50	6	52,5	90	-
АДП-1001	4	70	58	8	7,5	87	-
АДП-1262	6	74	70	8,8	4	122,5	1,6
АДП-1263	6	74	70	8,8	4	122,5	1,6
АДП-1362	8	89	85	12	5	135,5	2,6
АДП-1363	8	89	85	11,7	5	144,5	2,7
АДП-1563	10	112	108	14,7	6	183	5,7

П.3.3. Синхронные двигатели

П.3.3.1. Двигатели серии Г.

Двигатели серии Г – гистерезисные однофазные и трехфазные. Крепление двигателя – фланцевое. Режим работы – продолжительный.

Условия эксплуатации двигателей серии Г:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц 5...300

ускорение, m/s^2 50

Ударные нагрузки, m/s^2 120

Температура окружающей среды, $^{\circ}C$

Г201, Г210, Г303, Г506 -60...+50

Остальных двигателей 0...+40

Отн. влажн. воздуха при температуре $25^{\circ}C$

Г201, Г210, Г303, Г506 98

Остальных двигателей 80

Гарантийная наработка, час:

Г201, Г303

500

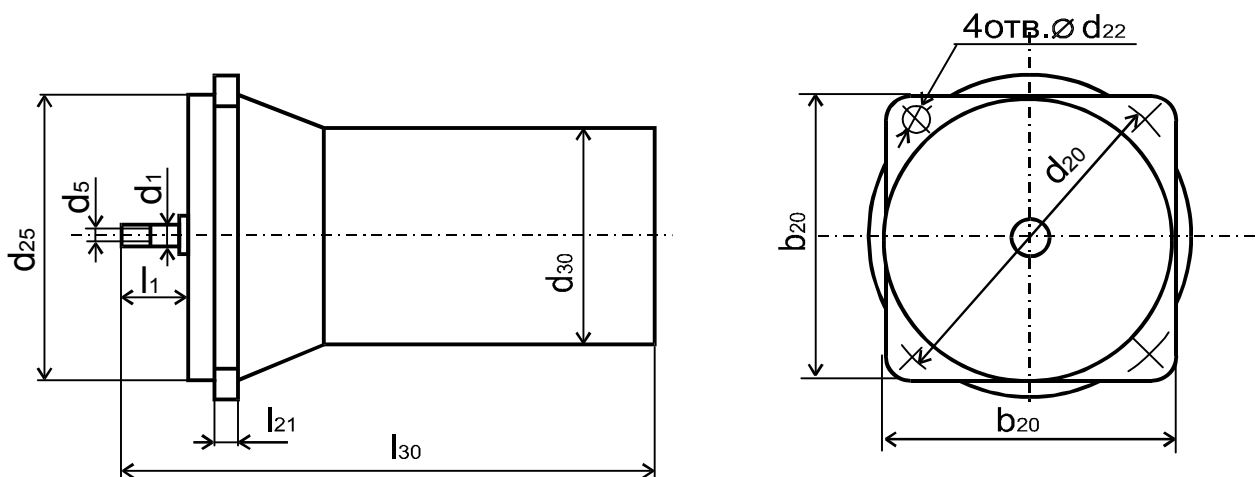
Остальных двигателей

1000

Таблица П.3.21. Технические данные двигателей серии Г

Тип двигателя	Число фаз	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , ГСМ	I _{НОМ} , А	КПД %
Г201	1	115	3	8000	37	0,3	11
Г202УХЛ4	3	127	2	3000	63	0,2	10
Г205УХЛ4	1	220	1,6	3000	51	0,09	8
Г210	3	40	5	7500	63	1	20
Г216УХЛ4	1	127	0,8	1500	53	0,15	5
ГГ303	1	115	16	8000	191	0,75	27
Г304УХЛ4	3	220	12	3000	392	0,26	30
Г313УХЛ4	3	220	7	1500	451	0,18	22
Г314УХЛ4	1	220	8	3000	255	0,17	23
Г315УХЛ4	1	127	8	3000	255	0,3	23
Г316УХЛ4	1	220	4	1500	255	0,16	14
Г317УХЛ4	1	127	4	1500	255	0,3	13
Г405УХЛ4	1	220	9	3000	284	0,25	28
Г409УХЛ4	1	127	9	3000	284	0,4	28
Г411УХЛ4	3	220	30	3000	974	0,5	43
Г412УХЛ4	3	220	20	1500	1275	0,42	35
Г413УХЛ4	1	220	16	3000	51	0,4	26
Г414УХЛ4	1	127	16	3000	51	0,6	26
Г415УХЛ4	1	220	12	1500	765	0,4	30
Г416УХЛ4	1	127	12	1500	765	0,6	30
Г504УХЛ4	3	220	60	3000	1960	1,16	50

Таблица П.3.22. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии Г



Продолжение таблицы П.3.22.

Тип двигателя	d ₁	d ₅	d ₂₀	d ₂₂	d ₂₅	d ₃₀	l ₁	l ₂₁	b ₂₀	l ₃₀	Масса
Г201-Г216	4	M4x0,5	64	3,5	55	49	15	5	53	80	0,32
Г303-Г317	5	M4x0,5	85	4,5	72	65	17	6	70	112	1
Г405-Г416	6	M5x0,5	102	4,5	88	79	20	6	82	139	1,9
Г504	7	M5x0,5	120	5,6	103	94	23	7	97	173	3,7

П.3.3.2. Двигатели серии ДСР.

Двигатели ДСР –2, ДСР-60 – гистерезисные трехфазные со встроенным редуктором. Для включения двигатель в однофазную сеть в качестве фазосдвигающего элемента используется конденсатор емкостью 1 мкф на рабочее напряжение не менее 300 В. Крепление двигателей – фланцевое. Режим работы – продолжительный. Питание двигателей – 220 В, 50 Гц.

Условия эксплуатации двигателей серии ДСР:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц 1...300

ускорение, м/с² 50

Ударные нагрузки, м/с² 150

Температура окружающей среды, °С -60...+70

Отн. влажн. воздуха при температуре 40°С 98

Гарантийная наработка, час: 10000

Таблица П.3.23. Технические данные двигателей серии ДСР

Тип двигателя	Число фаз	n _{ном} , об/мин	M _{ном} , гсм	M _п , гсм	I _{ном} , А	t _{вх} , с	L, мм	D, мм
ДСР-2	3/1	2	16/10	25/20	0,08	0,2	86	64
ДСР-60	3/1	60	1,5/1	3/2	0,08	0,2	86	64

Примечание. В таблице обозначено: t_{вх} – время входа в синхронизм.

П.3.4. Шаговые двигатели**П.3.4.1. Двигатели серий ДШ, ДШ-А, ДШ-В.**

Двигатели серий ДШ, ДШ-А, ДШ-В – четырехфазные с возбуждением от постоянных магнитов на роторе. Режим работы – продолжительный. Крепление двигателей – фланцевое.

Напряжение питания двигателей ДШ – 13,5 В, ДШ-А, ДШ-В – 27 В. Шаг 22,5°.

Условия эксплуатации двигателей серий ДШ, ДШ-А, ДШ-В:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц 1...1000

ускорение, м/с² 100

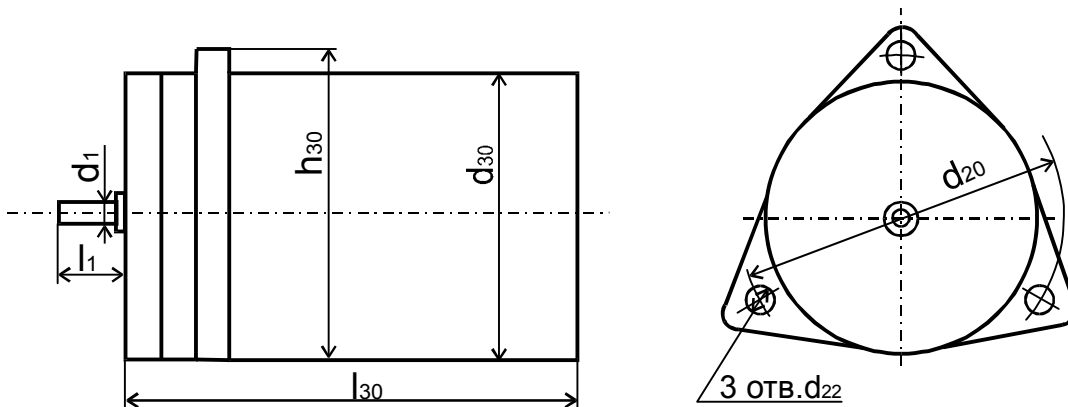
Ударные нагрузки, м/с² 400

Температура окружающей среды, °С	
ДШ и ДШ-А	-60...+100
ДШ-В	-60...+70
Отн. влажн. воздуха при температуре 35°С	98
Гарантийная наработка, час:	
ДШ и ДШ-А	1000
ДШ-В	5000

Таблица П.3.24. Технические данные двигателей серий ДШ, ДШ-А, ДШ-В

Тип двигателя	$M_{НОМ}$, гсм	$I_{НОМ}$, А	$f_{П\text{НОМ}}$, шаг/с	$f_{П\text{МАХ}}$, шаг/с	J_H , гсм ²	$M_{СТ\text{МАХ}}$, гсм
ДШ-0,025(А)	25	1,4(0,8)	280	330	2,45	200
ДШ-0,04(А)	40	1,9(0,9)	280	330	3,43	300
ДШ-0,04В	40	0,85	280	330	3,43	270
ДШ-0,1(А)	100	2,7(1,5)	180	230	18,6	800
ДШ-0,1В	100	1,45	180	230	18,6	750
ДШ-0,25(А)	250	3,5(2)	130	160	56,4	1300
ДШ-0,4(А)	400	6,3(3,2)	110	140	123	2100
ДШ-1(А)	1000	12,7(7)	70	90	412	6000

Таблица П.3.25. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серий ДШ, ДШ-А, ДШ-В



Тип двигателя	d_1	d_{30}	d_{22}	d_{20}	l_1	l_{30}	h_{30}	Масса
ДШ-0,025	3,8	40	3,1	73	9	73	48	0,25
ДШ-0,04	3,8	40	3,1	83	9	83	48	0,3
ДШ-0,1	4,8	50	4,5	97	10	97	61	0,55
ДШ-0,25	4,8	60	5,5	115	10	115	72	1,1
ДШ-0,4	8	80	7	127	20	127	93	1,8
ДШ-1	8	100	8,5	159	20	159	116	3,3

П.3.4.2. Двигатели серий ДШ.

Двигатели серии ДШ – четырехфазные с активным ротором и индукторного типа. Режим работы – продолжительный. Крепление двигателей – фланцевое.

Условия эксплуатации двигателей серий ДШ:

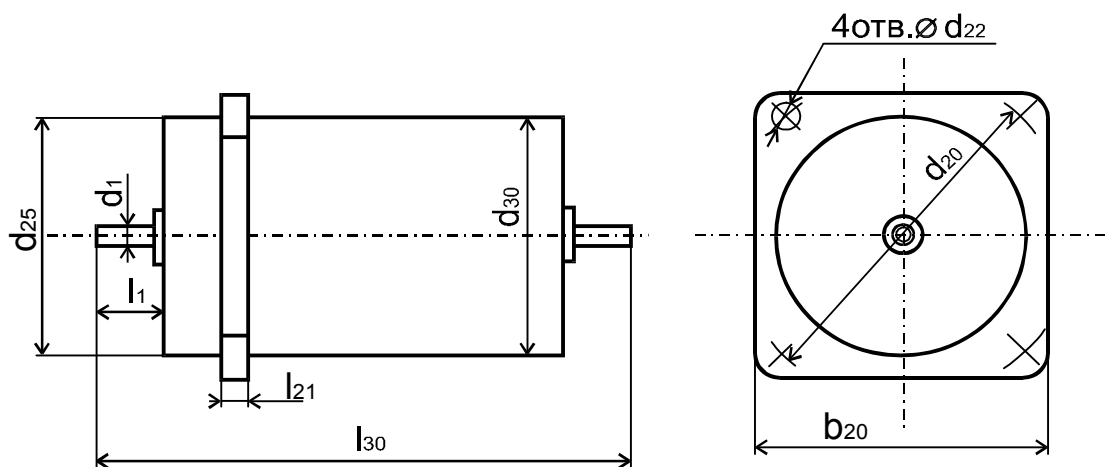
Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц	1...3000
ускорение, m/s^2	200
Ударные нагрузки, m/s^2	1500
Температура окружающей среды, $^{\circ}C$	-60...+70
Отн. влажн. воздуха при температуре $35^{\circ}C$	98
Гарантийная наработка, час:	5000

Таблица П.3.26. Технические данные двигателей серии ДШ

Тип двигателя	$M_{НОМ}$, гсм	α , град	$I_{НОМ}$, А	$f_{ПНОМ}$, шаг/с	$f_{ПМАХ}$, шаг/с	J_H , гсм ²	$M_{НОМ}$, гсм
ДШ34-0,0025	25	22,5	0,3	300	450	0,4	120
ДШ40-0,006	60	22,5	2,5	430	650	1	280
ДШ40-0,01	100	22,5	2,5	430	650	1	280
ДШ48-0,025	250	22,5	3,7	340	500	4	750
ДШ80-0,16	1600	22,5	8,7	230	360	60	4000
ДШ46-0,004	40	5	3,9	1000	1200	0,16	220
ДШ65-0,06	60	3	1,3	600	680	16	3000
ДШ78-0,16	1600	1	6,4	550	630	100	5600

Таблица П.3.27. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии ДШ



Продолжение таблицы П.3.27.

Тип двигателя	d_1	d_{20}	d_{22}	d_{25}	d_{30}	l_1	l_{21}	l_{30}	b_{20}	Масса
ДШ34-0,0025	3,8	40	3,4	32	34	12	2,5	69	37	0,21
ДШ40-0,006	3,8	25	М4	32	40	12	-	82	-	0,34
ДШ40-0,01	3,8	50	4,5	40	40	12	3	97	45	0,38
ДШ48-0,025	3,8	32	М5	40	48	12	-	88	-	0,6
ДШ80-0,16	8	100	7	80	80	20	4	157	86	2,5
ДШ46-0,004	2,8	60	4,5	50	46	10	2,5	80	52	0,36
ДШ65-0,06	8	75	5,8	60	65	20	3	140	67	1,2
ДШ78-0,16	12	100	7	80	78	30	4	170	86	2,3

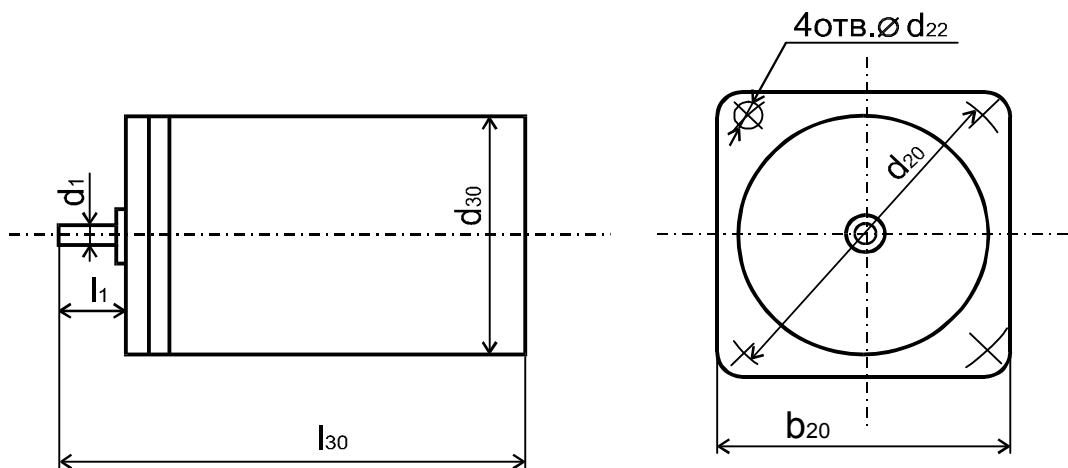
П.3.4.3. Двигатели серии ШДР.

Двигатели серии ШДР – четырехфазные индукторного типа с зубчатым пассивным ротором. Режим работы – продолжительный. Крепление двигателей – фланцевое.

Таблица П.3.28. Технические данные двигателей серий ДШР

Тип двигателя	U, В	M _{НОМ} , гсм	α , град	I _{НОМ} , А	f _{НОМ} , шаг/с	t _{гар} , час	J _Н , гсм ²	Темпер. среды °С
ШДР-231	27	10	9	0,85	700	1000	0,1	-60...60
ШДР-521	28	80	9	2,5	500	1000	5	-50...50
ШДР-711	10	300	3	2,9	400	1500	30	-50...50
ШДР-711В	27	300	3	2,9	400	1000	30	-60...70
ШДР-721	27	100	3	6,5	425	1000	280	5...50
ШДР-5	27	150	2,14	1,2	400	200	50	-50...50

Таблица П.3.29. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, двигателей серии ШДР



Продолжение таблицы П.3.29.

Тип двиг.	d_1	d_{20}	d_{22}	d_{30}	l_1	l_{30}	b_{20}	Масса
ШДР-231	2,5	38,6	2,3	35	12	83	35	0,21
ШДР-521	3	54,5	3,5	48	-	98	48	0,46
ШДР-711	3	70	4,5	60	16	69	62	0,38
ШДР-711В	3	70	4,5	60	19	72	62	0,42
ШДР-721	3	70	3,5	60	16	83	62	0,6
ШДР-5	3	65	3,5	58	-	50	70	0,28

П.3.4.4. Двигатели серии ДВШ.

Двигатели серии ДВШ – четырех- и восьмифазные волновые. Режим работы – продолжительный. Крепление двигателей – фланцевое. Напряжение питания – 12 В.

Условия эксплуатации двигателей серий ДВШ:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц

ДВШ50

1...5000

ДВШ80

1...600

ускорение, m/c^2

ДВШ50

200

ДВШ80

100

Ударные нагрузки, m/c^2

400

Температура окружающей среды, $^{\circ}C$

-60...+70

Отн. влажн. воздуха при температуре $35^{\circ}C$

98

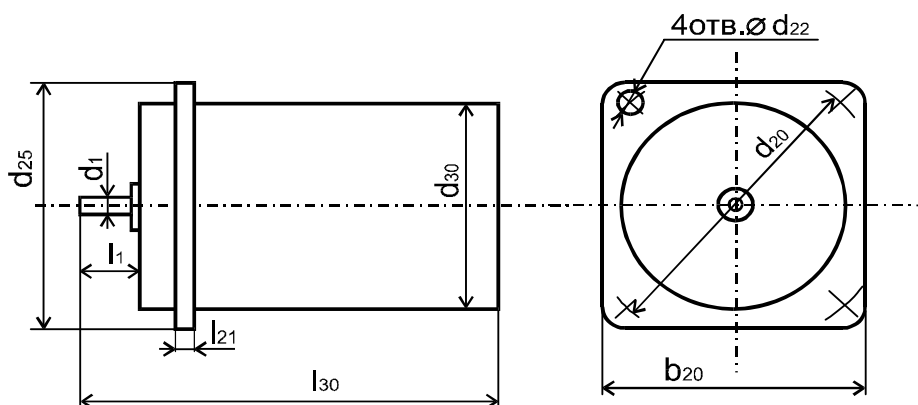
Гарантийная наработка, час:

1000

Таблица П.3.30. Технические данные двигателей серий ДВШ

Тип двигателя	$M_{НОМ}$ гсм	α , град	$I_{НОМ}$, А	$f_{ПНОМ}$, шаг/с	$f_{П ПР}$, шаг/с	$J_{Н_2}$, гсм ²	$M_{СТМАХ}$ гсм
ДВШ50-0,04	400	0,5	1,15	300	1300	200	300
ДВШ80-0,6	6000	0,45	5,3	250	1400	2500	20000
2ДВШ80-0,6	6000	0,45	5,3	250	1400	2500	20000
3ДВШ80-0,6	6000	0,45	5,3	250	1400	2500	20000

Таблица П.3.31. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, двигателей серии ДВШ



Продолжение таблицы П.3.31.

Тип двигателя	d ₁	d ₂₀	d ₂₂	d ₂₅	d ₃₀	l ₁	l ₂₁	l ₃₀	b ₂₀	Масса
ДВШ50-0,04	4	60	4,5	50	50	12	5	112	56	0,55
ДВШ80-0,6	10	100	7	80	80	20	8	150	86	1,7
2ДВШ80-0,6	10	100	7	80	80	20	8	150	86	1,7
3ДВШ80-0,6	10	100	7	80	80	40	8	195	86	1,7

П.3.5. Коллекторные двигатели постоянного тока

П.3.5.1. Двигатели серии СЛ.

Двигатели серии СЛ с электромагнитным возбуждением. Двигатели конструктивно изготавливаются двух модификаций – со стабилизацией скорости вращения и без стабилизации. В условном обозначении первых цифровое обозначение заканчивается на 0, за исключением двигателей СЛ –240С и СЛ-570С. Для стабилизации скорости вращения используется встроенный центробежный контактный регулятор, обеспечивающий точность стабилизации в пределах $\pm 0,5\%$. Крепление двигателя – за корпус.

По виду возбуждения двигатели делятся на двигатели с параллельным, последовательным и независимым возбуждением. Двигатели со стабилизацией скорости вращения имеют параллельное возбуждение.

В зависимости от условий применения двигатели имеют три исполнения – нормальное, тропическое и нагревостойкое. Для первого и второго в конце условного обозначения соответственно указываются буквы ТВ и Н.

Таблица П.3.32. Технические данные двигателей серий СЛ без стабилизации скорости вращения

Тип Двигателя		U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	I _{НОМ} , А	η %
СЛ-121	-пар	110	5	3500	137	0,3	15
СЛ-161	-пар	110	7,5	3500	207	0,25	27
СЛ-163	-псл	110	8,3	3500	225	0,27	28
СЛ-221,221ТВ	-псл	110	13	3600	343	0,35	33
СЛ-261, 261У	-пар	110	24	3600	637	0,53	41
СЛ-261ТВ, 261Н	-пар	110	24	3600	637	0,55	41
СЛ-263	-нзв	110	24	3600	637	0,47	24
СЛ-267, 267ТВ	-пар	110	27	3800	637	0,9	27
СЛ-281,281ТВ,281Н		24	26	5200	490	2,55	43
СЛ-240С, 240СТВ-пар		24	17,5	3400	490	1,9	38
СЛ-321, 321ТВ	-пар	110	38	3000	1220	0,75	46
СЛ-327	-пар	110	29,5	3200	880	0,9	29

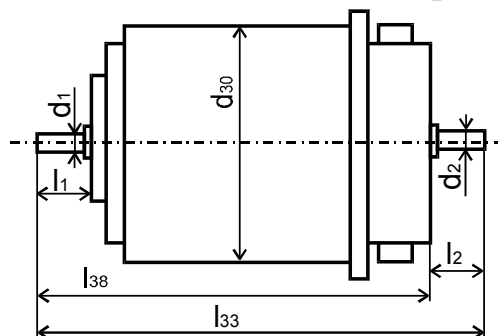
СЛ-329, 329ТВ	-пар	24	23,5	2300	980	2,5	39
СЛ-361, 361ТВ	-пар	110	50	3000	1570	0,85	53
СЛ-365	-нзв	110	56	3240	1670	1,4	22
СЛ-367, 367ТВ	- пар	110	32	2500	1220	1	29
СЛ-369,369ТВ,369Н		110	55	3600	1470	0,9	55
СЛ-369М	-пар	24	55	3000	1760	5	45
СЛ-369Б	-пар	220	43,5	3550	1180	0,4	49
СЛ-521	-пар	110	77	3000	2450	1,2	58
СЛ-523	-псл	110	74	3000	2350	1,15	58
СЛ-525	-псл	110	78	3800	1960	1,2	59
СЛ-525А	-псл	24	28,5	2800	980	3	40
СЛ-563	-псл	110	110	3800	2740	1,5	67
СЛ-569	-пар	110	160	3300	4650	2,2	66
СЛ-569К	-пар	110	36	850	4120	0,8	41
СЛ-570С	-пар	24	180	3500	4900	11,5	65
СЛ-571К	-пар	24	95	2000	4120	7	57
СЛ-621	-пар	110	172	2400	6860	2,3	68
СЛ-661	-пар	110	230	2400	9060	2,9	72
СЛ-661Р	-пар	220	200	2900	6860	1,45	63

В таблице П.3.32 обозначено: пар – параллельное возбуждение, псл – последовательное возбуждение, нзв – независимое возбуждение.

Таблица П.3.33. Технические данные двигателей СЛ со стабилизацией скорости вращения

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	I _{НОМ} , А	КПД %
СЛ-220	110	3,6	3500	980	0,28	11
СЛ-240,240ТВ	22	18,5	4500	3920	2,5	33
СЛ-320,320ТВ	110	18,5	4500	3920	0,5	34
СЛ-340,340ТВ	22	16,5	4000	3920	2,2	34
СЛ-350,350ТВ	220	18,5	4500	3920	0,3	28
СЛ-360,360ТВ	110	23	4500	4900	0,6	35
СЛ-370	22	28	4500	5880	3,2	38
СЛ-370Н	22	28	4500	5880	3,2	40
СЛ-570	110	77	3000	24500	1,2	58
СЛ-380	27	23	4500	4900	3,2	37

Таблица П.3.34. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, двигателей серий СЛ без стабилизации скорости вращения



Продолжение таблицы П.3.34.

Тип двигателя	d ₁	d ₂	d ₃₀	l ₁	l ₂	l ₃₃	l ₃₈	Масса
СЛ-221А	6	6	70	9,5	10,6	113,5	97,5	0,9
СЛ-261У	6	6	70	9,5	14,6	125,5	119	1,25
СЛ-281	-	6	70	-	21	-	108,5	1,25
СЛ-267	-	6	70	-	-	-	108,5	1,25
СЛ-221	6	-	70	9,5	-	-	97,5	0,9
Остальные 200-го габарита	6	-	70	9,5	13-	-	108,5	1,25
СЛ-369А	-	7	85	13	-	146	121	2
СЛ-329	-	-	85	13	-	-	111	1,7
СЛ-321, 327	-	-	85	13	-	-	111	2
Остальные 300-го габарита	-	-	85	13	35,7	-	121	2
СЛ-521, 523, 525	10	-	108	16,2	-	-	132	3,3
СЛ-525А	9	9	108	35,7	35,7	196	132	3,3
СЛ-563, 569, 571	10	-	108	16,2	-	-	157	4,5
СЛ-570С	10	-	108	16,2	-	-	182,8	5,8
СЛ-621	10	10	130	16,5	16,5	204	172	7,5
СЛ-661	10	10	130	16,5	16,5	234	202	9,7

П.3.5.2. Двигатели серии ДПМ.

Двигатели серии ДПМ с возбуждением от постоянных магнитов с барабанным пазовым якорем имеют следующие конструктивные исполнения:

Н1 – с одним выходным концом вала (с трибкой на валу);

Н2 – с двумя выходными концами вала;

Н3 – с одним выходным концом вала и встроенным центробежным контактным регулятором скорости вращения. Точность стабилизации 2...4%.

Н6 – с одним выходным концом вала, таходатчиком, являющимся измерительным органом в системе стабилизации скорости вращения и электронным регулятором скорости вращения, выполненным в виде отдельного блока.

Крепление двигателей – за корпус с помощью немагнитных деталей. Двигатели исполнений Н1, Н2 предназначены для работы при обоих направлениях вращения, причем изменение направления вращения на ходу, без предварительной остановки двигателя, не допускается. Режим работы – повторно-кратковременный и длительный. Первые две цифры обозначают диаметр двигателя в мм.

Таблица П.3.35. Технические данные двигателей серий ДПМ-Н1, Н2

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	M _П , гсм	I _{НОМ} , А	t _{НАР} , час	Вкл/выкл
ДПМ-20-Н1,Н2-01	29	0,46	9000	4,9	49	0,1	200	Прод
ДПМ-20-Н1,Н2-02	27	0,41	4000	9,8	19,6	0,11	250	Прод
ДПМ-20-Н1,Н2-04	6	0,04	2000	1,9	5,9	0,1	500	Прод

ДПМ-20-Н1,Н2-05	14	0,04	2000	1,9	9,8	0,07	500	Прод
ДПМ-20-Н1,Н2-08	27	0,92	4500	19,6	39,2	0,2	250	Прод

Продолжение таблицы П.3. 35.

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	M _П , гсм	I _{НОМ} , А	t _{НАР} час	Вк/вык мин
ДПМ-20-Н1-08Т	27	0,92	4500	19,6	34,3	0,25	-	3/5
ДПМ-20-Н1,Н2-12	12	1,23	6000	19,6	49	0,4	300	Прод
ДПМ-20-Н1,Н2-13	12	0,69	4500	14,7	39,2	0,28	250	Прод
ДПМ-20-Н1,Н2-16	6	0,92	9000	9,8	59	0,65	250	Прод
ДПМ-20-Н1,Н2-17	6	0,92	6000	14,7	59	0,65	350	Прод
ДПМ-25-Н1,Н2-01	29	3,22	9000	34,3	59	0,4	100	Прод
ДПМ-25-Н1,Н2-02	27	0,46	3800	29,4	98	0,13	500	Прод
ДПМ-25-Н1,Н2-03	12	2,77	6000	44,1	98	0,85	300	Прод
ДПМ-25-Н1,Н2-04	27	1,28	2500	49	78,5	0,22	1000	Прод
ДПМ-25-Н1,Н2-05	15	1,28	2500	49	78,5	0,28	800	Прод
ДПМ-25-Н1,Н2-07	27	2,31	4500	49	118	0,28	500	Прод
ДПМ-25-Н1-07Т	27	2,54	4500	53,9	123	0,35	-	3/5
ДПМ-25-Н1,Н2-10	14	2,31	4500	49	118	0,55	500	Прод
ДПМ-25-Н1Т-01	27	1,85	9000	19,6	118	0,38	100	Прод
ДПМ-30-Н1,Н2-01	29	6,47	9000	68,6	343	0,75	100	Прод
ДПМ-30-Н1,Н2-02	27	2,67	2600	98	196	0,3	800	Прод
ДПМ-30-Н1,Н2-03	27	4,62	4500	98	294	0,6	500	Прод
ДПМ-30-Н1-03Т	27	6	4500	127	246	0,85	-	3/5
ДПМ-30-Н1,Н2-04	26	5,65	5500	98	246	0,7	300	Прод
ДПМ-30-Н1,Н2-05	27	4,31	6000	69	246	0,5	300	Прод
ДПМ-30-Н1,Н2-09	12	6,16	6000	98	343	1,4	200	Прод
ДПМ-30-Н1,Н2-10	14	4,62	4500	98	275	1	500	Прод
ДПМ-30-Н1,Н2-19	12	2,57	2500	98	196	0,75	600	Прод
ДПМ-35-Н1,Н2-01	27	13,87	9000	147	686	1,5	100	Прод
ДПМ-35-Н1,Н2-02	27	5,39	3500	147	490	0,65	500	Прод
ДПМ-35-Н1-03	6	4,25	1800	226	343	2,5	1000	Прод
ДПМ-35-Н1,Н2-04	27	12,32	6000	196	686	1.3	200	Прод

Таблица П.3.36. Технические данные двигателей серии ДПМ-НЗ

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	M _П , гсм	I _{НОМ} , А	t _{НАР} час	Напр вращ
ДПМ-20-НЗ-01	27	0,92	9000	9,8	49	0,24	50	Лев
ДПМ-20-НЗ-09	12	0,92	4500	19,6	39,2	0,55	100	Прав
ДПМ-25-НЗ-01	27	0,62	6000	9,8	118	0,37	150	Лев
ДПМ-25-НЗ-02А	28	2	9000	21,6	118	0,8	50	Лев
ДПМ-25-НЗ-02Б	27	3,7	9000	39,2	98	0,75	-	Прав

ДПМ-25-Н3-02Г	28	2	9000	21,6	118	0,6	50	Лев
ДПМ-25-Н3-03	12	0,62	6000	9,8	118	0,6	150	Прав
ДПМ-25-Н3-03А	14	1,85	6000	29,4	98	0,9	150	Лев
ДПМ-25-Н3-04	28	2,47	12000	19,6	118	0,65	30	Прав

Продолжение таблицы П.3.36.

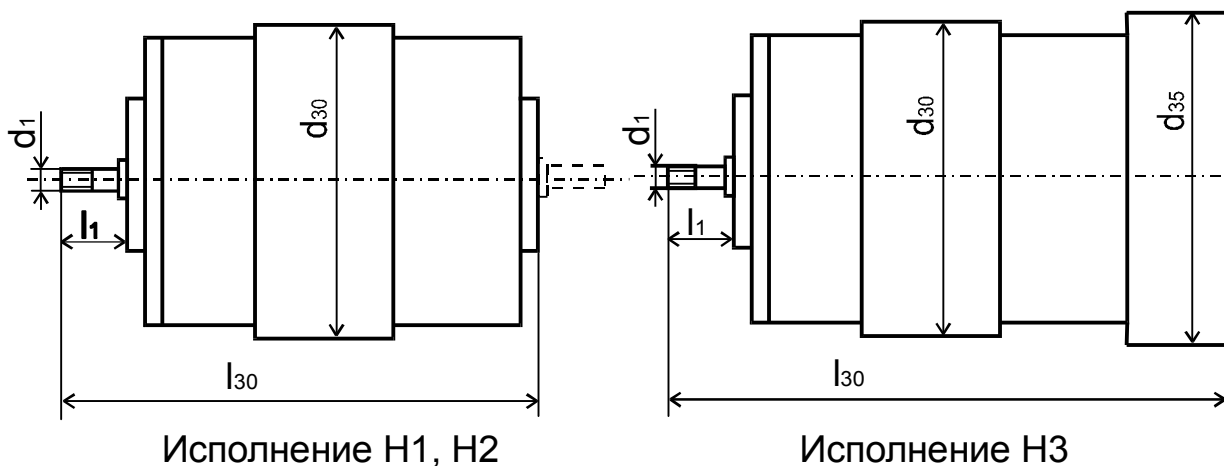
Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	M _П , гсм	I _{НОМ} , А	t _{НАР} час	Напр вращ
ДПМ-25-Н3-05	24	0,92	4500	19,6	98	0,4	50	Прав
ДПМ-25-Н3-09	24	1,23	6000	19,6	98	0,45	50	Лев
ДПМ-25-Н3-16	27	3	5200	54,9	98	0,7	100	Прав
ДПМ-25-Н3Т-01Б	28	2	9000	21,6	118	0,6	50	Прав
ДПМ-30-Н3-01	27	6,47	9000	68,6	392	1	50	Лев
ДПМ-30-Н3-01А	23	6,47	9000	68,6	294	1,25	50	Лев
ДПМ-30-Н3-08	28	2,47	12000	19,6	196	1	30	Прав

Таблица П.3.37. Технические данные двигателей серии ДПМ-Н6

Тип двигателя	Регулятор скорости	I _{НОМ} , А	M _П , гсм	Кпд, %	δn, %	t _{НАР} час	Напр вращ
ДПМ-25-Н6-02	РС-3-04А	0,6	147	19	0,5	150	Прав
ДПМ-25-Н6-02	РС-3-05	0,85	98	26	1	150	Прав
ДПМ-25-Н6-02	РС-3-04	0,6	98	19	1	150	Лев
ДПМ-30-Н6-02	РС-3-02Д	0,75	245	15	0,7	100	Лев
ДПМ-30-Н6-02И	РС-3-02	0,75	343	15	0,5	300	Прав
ДПМ-30-Н6-02И	РС-0-02	0,75	343	15	-	300	Прав

Электромеханическая постоянная времени двигателей серии ДПМ лежит в пределах 0,035...0,055 с.

Таблица П.3.38. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, ДПМ-Н1, Н2, Н3



Продолжение таблицы П.3.38

Тип двигателя	d ₁	d ₃₀	d ₃₅	l ₁	l ₃₀	Масса
ДПМ-20-Н1, Н2	M2x0,25	20	-	7	46	0,065
ДПМ-20-Н3	M2x0,25	20	20,4	7	58	0,075
ДПМ-25-Н1, Н2	M2x0,25	25	-	9	55,5	0,120
ДПМ-25-Н3	M2x0,25	25	25,2	9	69	0,14
ДПМ-30-Н1, Н2	M3x0,35	30	-	10,5	69	0,22
ДПМ-30-Н3	M3x0,35	30	30	10,5	84	0,25
ДПМ-35-Н1, Н2	M3x0,35	35	-	12,5	78,5	0,34

П.3.5.3. Двигатели серии ДПР.

Двигатели серии ДПР выполняются с возбуждением от постоянных магнитов, с полым бескаркасным якорем. Двигатели объединены в несколько серий, отличающихся друг от друга основными параметрами, режимами работы и условиями эксплуатации. Двигатели каждой серии имеют четыре конструктивных исполнения:

Н1, Н4, Н5 – нормальное с одним выходным концом вала;

Н2, Н7, Н8, Н9 – нормальное с двумя выходными концами вала;

Ф1, Ф4, Ф5 – фланцевое с одним выходным концом вала;

Ф2, Ф7, Ф8, Ф9 – фланцевое с двумя выходными концами вала.

Кроме двигателей, объединенных в серию, имеются модификации, а также двигатели с таходатчиками и с электронным регулятором скорости вращения, выполненными в виде отдельного блока.

Крепление двигателей исполнения Н производится за корпус, а исполнения Ф – за фланец.

Режим работы – продолжительный. Двигатели ДПР-Н4, Н7, Ф4, Ф7 могут также работать при повторно-кратковременном реверсивном режиме при питании напряжением синусоидальной формы амплитудой до 6 В, частотой для двигателей ДПР-42, 52 до 6 Гц, ДПР-62, 72 до 2,5 Гц (продолжительность работы не более 60 мин с последующим перерывом не менее 60 мин).

Двигатели ДПР-Н5, Н9, Ф5, Ф9 предназначены также для работы при питании от широтно-импульсного модулятора, обеспечивающего среднее значение напряжения 20 В, частоту следования импульсов не менее 500 Гц и скважность импульсов не менее 0,2; форма импульса – прямоугольная..

Электромеханическая постоянная времени двигателей ДПР находится в пределах 0,015...0,02 с.

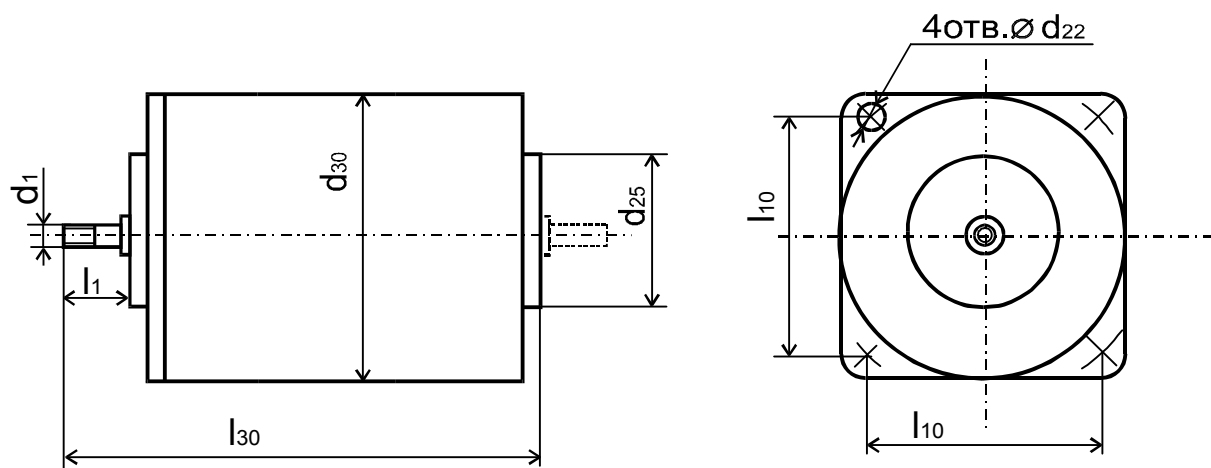
Таблица П.3.39. Технические данные двигателей серии ДПР-Н1, Н2, Ф1, Ф2

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	M _П , гсм	I _{НОМ} , А	t _{НАР} час
ДПР-2-01	12	0,92	9000	9,8	21,6	0,195	300
	6	0,12	6000	1,96	15,7	0,1	300
ДПР-2-13	12	0,92	4500	19,6	54	0,21	2000
ДПР-32-07	12	0,64	2500	24,5	49	0,18	2000
ДПР-32-08	27	3,1	6000	49	196	0,24	1000
ДПР-42-02	27	2,3	4500	49	128	0,2	2500
ДПР-42-03	12	3,1	6000	49	196	0,55	800
ДПР-42-06	14	2,3	4500	49	147	0,345	2000
ДПР-42-07А	27	6,15	6000	98	687	0,5	1000
ДПР-52-02	27	4,6	4500	98	540	0,32	2500
ДПР-52-03	27	2,6	2500	98	294	0,24	4000
ДПР-52-04	14	4,6	4500	98	540	0,62	1500
ДПР-52-07А	27	12,3	6000	196	1374	0,82	1000
ДПР-62-02	27	9,25	4500	196	1180	0,7	1000
ДПР-62-03	14	9,25	4500	196	785	1,3	1500
ДПР-62-07А	27	18,5	4500	392	245	1,3	1000
ДПР-72-03							

Таблица П.3.40. Технические данные двигателей серии ДПР-Н4, Н7, Ф4, Ф7 (напряжение питания 27 В, скорость вращения 6000 об/мин).

Тип двигателя	P _{2НОМ} , Вт	M _{НОМ} , гсм	M _П , гсм	I _{НОМ} , А	t _{НАР} час	t _{СРЕДЫ} , град
ДПР-42	2,3	39,2	294	0,22	1100	-60...+70
ДПР-52	6	98	930	0,46	1100	-60...+70
ДПР-62	16	255	1960	1	1100	-60...+70
ДПР-72	25	392	3920	1,45	1100	-60...+70

Таблица П.3.41. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии ДПР, кроме ДПР с ТИ (ТС) и ДПР с РС



Продолжение таблицы П.3.41.

Тип двигателя	d ₁	d ₂₂	d ₂₅	d ₃₀	l ₁	l ₁₀	l ₃₀	Масса
ДПР-2 -Н1, Н2, Ф1, Ф2	M2x0,25	1,6	12	15	7	12,4	45,6	0,036
ДПР-32- Н1, Н2, Ф1, Ф2	M3x0,35	2	15	20	7,5	16,6	56	0,08
ДПР-32- Н5, Н8, Ф5, Ф8	M3x0,35	2	15	20	7,5	16,6	57	0,09
ДПР-42- Н1, Н2, Ф1, Ф2	M3x0,35	2,4	17	25	9	21	66	0,15
ДПР-42- Н4, Н7, Ф4, Ф7	M3x0,35	2,4	17	25	9	21	73	0,15
ДПР-42- Н5, Н8, Ф5, Ф8	M3x0,35	2,4	17	25	9	21	69	0,17
ДПР-42- Н5, Н9, Ф5, Ф9	M3x0,35	2,4	17	25	9	21	69	0,17
ДПР-52- Н1, Н2, Ф1, Ф2	M4x0,35	2,9	22	30	12	25	77,7	0,26
ДПР-52- Н4, Н7, Ф4, Ф7	M4x0,35	2,9	22	30	12	25,2	84,5	0,29
ДПР-52- Н5, Н8, Ф5, Ф8	M4x0,35	2,9	22	30	12	25,2	80,5	0,285
ДПР-52- Н5, Н9, Ф5, Ф9	M4x0,35	2,9	22	30	12	25,2	80,5	0,285
ДПР-62- Н1, Н2, Ф1, Ф2	M4x0,5	3,4	22	35	14	29,6	89,7	0,41
ДПР-62- Н4, Н7, Ф4, Ф7	M4x0,5	3,4	22	35	14	29,6	96,5	0,45
ДПР-62- Н5, Н8, Ф5, Ф8	M4x0,35	3,4	22	35	14	29,6	91,5	0,44
ДПР-62- Н5, Н9, Ф5, Ф9	M4x0,35	3,4	22	35	14	29,6	91,5	0,44
ДПР-72- Н1, Н2, Ф1, Ф2	M4x0,5	3,9	22	40	16	33,6	104,7	0,6
ДПР-72- Н4, Н7, Ф4, Ф7	M4x0,5	3,9	22	40	16	33,6	107,5	0,66
ДПР-72- Н5, Н8, Ф5, Ф8	M4x0,35	3,9	22	40	16	33,6	103,5	0,64
ДПР-72- Н5, Н9, Ф5, Ф9	M4x0,35	3,9	22	40	16	33,6	103,5	0,64

П.3.5.4. Двигатели серий 10.../16.../22.../23.../28...

Двигатели серий 10.../16.../22.../23.../28... исполнительные с возбуждением от постоянных магнитов с полым ротором со встроенным тахогенератором производства ФРГ. Крепление двигателей – фланцевое.

Допустимая температура нагрева двигателей серии 1016 – 85 °С, остальных – 125 °С.

Таблица П.3.42. Технические данные двигателей серий 10.../16.../22.../23.../28...

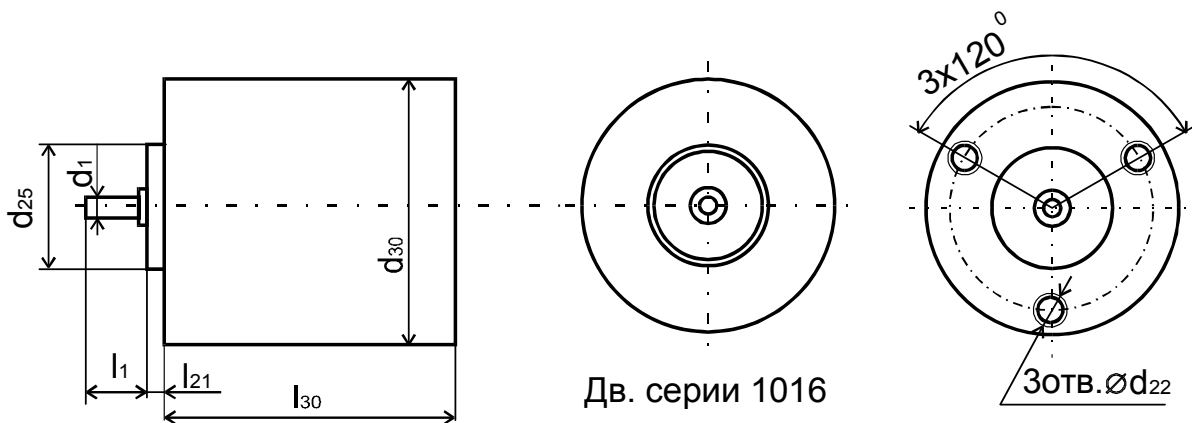
Тип двигателя	U _н , В	P _{2н} , Вт	I _н , А	M _н , гсм	n _{ном} , об/мин	τ _м , мс	J _p , гсм ²	k _{тг} , мВ/об/мин
1016/003G	3	0,14	0,28	5	2686	9	0,04	0,21
1016/006G	6	0,32	0,19	5	6231	9	0,06	0,35
1016/012G	12	0,22	0,085	5	4187	9	0,05	0,775
1624/006S	6	0,66	0,425	15	4240	16	0,52	0,553
1624/012S	12	1,02	0,255	15	6497	19	0,59	0,905
1624/024S	24	1,26	0,145	15	8027	24	0,78	1,635

Продолжение таблицы П.3.42.

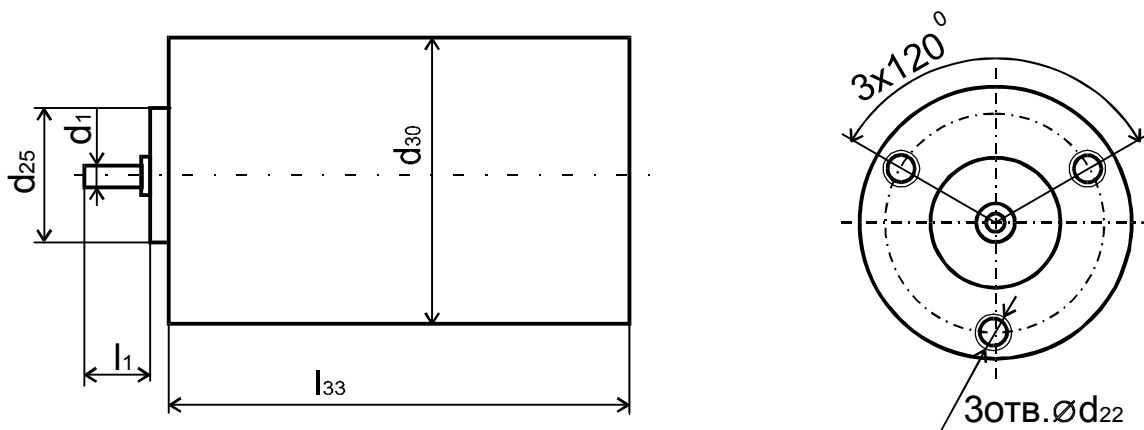
Тип двигателя	U_H , В	P_{2H} , Вт	I_H , А	M_H , ГСМ	$n_{НОМ}$, об/мин	τ_M , мс	J_P , ГСМ ²	$k_{ТГ}$, мВ/об/мин
2233	6	1,4	0,905	30	4530	11	1,92	0,712
/006S	12	1,6	0,495	30	5140	12	2,22	1,338
2233012S	18	1,6	0,31	30	5000	14	2,14	1,957
2233018S	24	1,4	0,2	30	4680	11	1,28	2,574
2233024S	30	1,4	0,15	30	4480	12	1,05	3,038
2233030S	6	1,8	1	30	4228	17	3,86	0,768
2338006S	9	1,8	0,69	40	4330	17	3,72	1,117
2338009S	12	1,9	0,52	40	4613	17	3,37	1,408
2338012S	18	1,8	0,34	40	4283	17	3,6	2,232
2338018S	24	1,9	0,27	40	4530	17	3,75	2,896
2338024S	6	6	1,675	200	2899	13	9,7	1,094
2842006C	12	6,4	0,92	200	3096	15	11,8	2,197
2842012C	24	6,4	0,46	200	3054	15	12,5	4,484
2842024C	28	6,4	0,4	200	3092	15	12	5,126
2842028C	36	6,6	0,313	200	3189	15	13,6	6,468
2842036C								

Таблица П.3.43. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серий 10.../16.../22.../23.../28... .

Без тахогенератора



С тахогенератором



Продолжение таблицы П.3.43.

Тип двиг.	d ₁	d ₂₅	d ₃₀	d ₂₂	l ₁	l ₂₁	l ₃₀	l ₃₃	Масса
1016/003G	1,5	M5,5x0,5	10	-	5,2	1,9	15,7	-	0,0065
1016/006G	1,5	M5,5x0,5	10	-	5,2	1,9	15,7	-	0,0065
1016012G	1,5	M5,5x0,5	10	-	5,2	1,9	15,7	-	0,0065
1624006S	1,5	6	16	M1,6	8,1	-	23,8	41,4	0,021
1624012S	1,5	6	16	M1,6	8,1	-	23,8	41,4	0,021
1624024S	1,5	6	16	M1,6	8,1	-	23,8	41,4	0,021
2233006S	2	7	22	M2	8,1	-	32,8	51,9	0,061
2233012S	2	7	22	M2	8,1	-	32,8	51,9	0,061
2233018S	2	7	22	M2	8,1	-	32,8	51,9	0,061
2233024S	2	7	22	M2	8,1	-	32,8	51,9	0,061
2233030S	2	7	22	M2	8,1	-	32,8	51,9	0,061
2338006S	3	10	23	M2	10	-	37,6	56,8	0,07
2338009S	3	10	23	M2	10	-	37,6	56,8	0,07
2338012S	3	10	23	M2	10	-	37,6	56,8	0,07
2338018S	3	10	23	M2	10	-	37,6	56,8	0,07
2338024S	3	10	23	M2	10	-	37,6	56,8	0,07
2842006C	3	-	28	M2	12,4	-	42	-	0,132
2842012C	3	-	28	M2	12,4	-	42	-	0,132
2842024C	3	-	28	M2	12,4	-	42	-	0,132
2842028C	3	-	28	M2	12,4	-	42	-	0,132
2842036C	3	-	28	M2	12,4	-	42	-	0,132

Примечание: данные приведены для температуры 22 °С.

П.3.5.5. Двигатели серии 35.

Двигатели серии 35 исполнительные с возбуждением от постоянных магнитов с полым ротором со встроенным тахогенератором производства ФРГ. Крепление двигателей – фланцевое. Допустимая температура нагрева двигателей – 125 °С.

Таблица П.3.44. Технические данные двигателей серии 35

Тип двигателя	U _н , В	P _{2н} , Вт	I _н , А	M _н , гсм	n _{ном} , об/мин	τ _м , мс	J _р , гсм ²	k _{тг} , мВ/об/мин	Масса, кг
3540/006С	6	8,3	2,4	250	3203	30	23	1,049	0,18
3540/012С	12	9,8	1,3	250	3770	24	19,9	1,907	0,18
3540/015С	15	9,7	1,05	250	3719	25	20,1	2,424	0,18
3540/024С	24	9,3	0,625	250	3572	25	18,6	3,919	0,18
3557/006С	6	14,4	3,58	450	3069	15	30,5	1,255	0,27
3557/009С	9	15,5	2,44	450	3298	14	25,4	1,769	0,27
3557/012С	12	14,7	1,79	450	3138	13	24,9	2,455	0,27
3557/020С	20	14,1	1,08	450	3010	13	26,7	4,276	0,27
3557/024С	24	14,4	0,86	450	3064	13	23,1	4,902	0,27
3557/032С	32	14,2	0,65	450	3027	13	24	6,682	0,27

Продолжение таблицы П.3.44

Тип двигателя	U _н , В	P _{2н} , Вт	I _н , А	M _н , гсм	n _{ном} , об/мин	τ _м , мс	J _p , гсм ²	k _{тг} , мВ/об/мин	Масса, кг
3557/009CS	9	22,4	3,32	500	4292	16	42,6	1,556	0,27
3557/012CS	12	20,9	2,4	500	4009	16	46,9	2,191	0,27
3557/020CS	20	21	1,39	500	4027	16	46,9	3,585	0,27
3557/020CS	24	21,3	1,18	500	4069	16	49	4,299	0,27
3557/024CS	48	20	0,58	500	3828	16	46,5	9,054	0,27
3557/048CS	12	27,7	4,13	600	4426	7	64,4	2,245	0,29
3557/012CR	24	27,7	2,07	600	4424	7	64,4	4,491	0,29
3557/024CR	48	27,8	1,05	600	4436	7	66	8,983	0,29
3557/048CR									

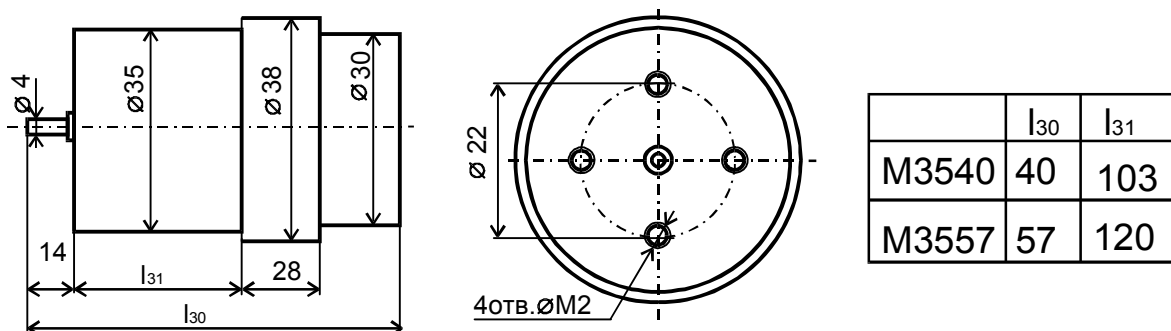


Таблица П.3.45. Габаритные и установочные размеры, мм, серии 35.

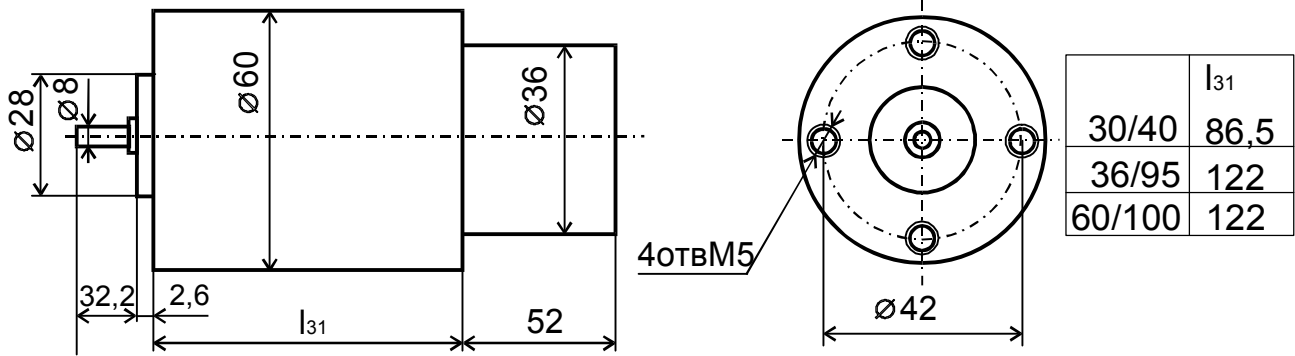
П.3.5.6. Двигатели серии МАМ.

Двигатели серии МАМ исполнительные с возбуждением от постоянных магнитов с полым ротором со встроенным тахогенератором производства ФРГ. Крепление двигателей – фланцевое. Допустимая температура нагрева двигателей – 125 °С.

Таблица П.3.46. Технические данные двигателей серии МАМ

Тип двигателя	U _н , В	P _{2н} , Вт	I _н , А	M _н , гсм	n _{ном} , об/мин	τ _м , мс	J _p , гсм ²	k _{тг} , мВ/об/мин	Масса, кг
МАМ30/40	30	40	2,17	1300	4000	34,4	662	6,3	0,79
МАМ36/95	36	95	3,2	3000	3000	16,4	1220	10,5	1,3
МАМ60/100	60	100	1,7	3200	3000	16	1140	20	1,3

Таблица П.3.47. Габаритные и установочные размеры, мм, серии МАМ



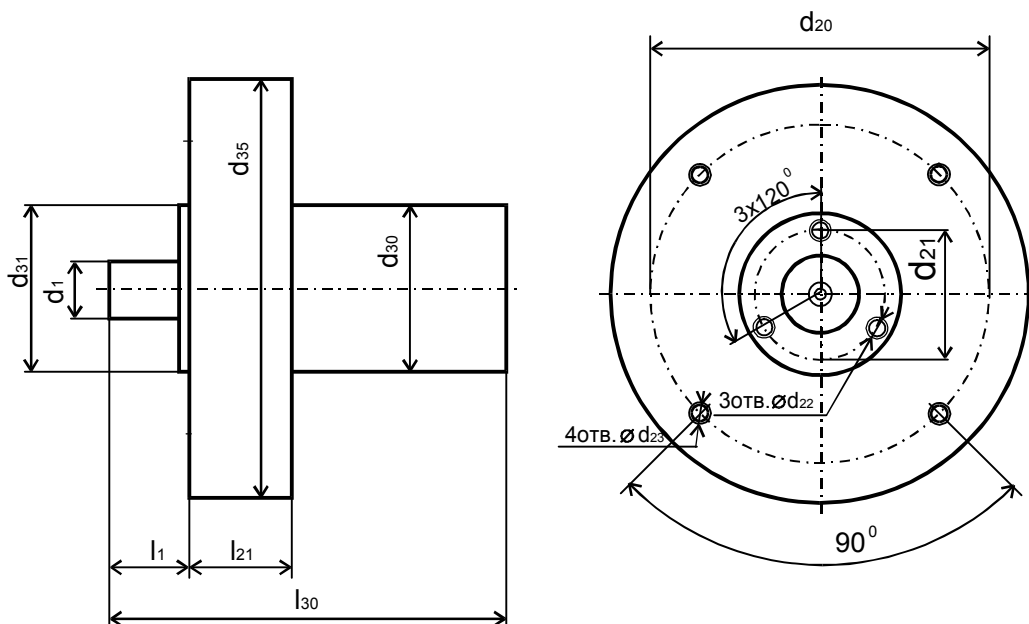
П.3.5.7. Двигатели серии GDM.

Двигатели серии GDM исполнительные с возбуждением от постоянных магнитов с дисковым ротором со встроенным тахогенератором производства ФРГ. Крепление двигателей – фланцевое. Допустимая температура нагрева двигателей – 150 °С.

Таблица П.3.48. Технические данные двигателей серии GDM.

Тип двигателя	U_H , В	P_{2H} , Вт	I_H , А	M_H , ГСМ	$n_{ном}$, об/мин	τ_M , мс	J_P , ГСМ ²	$k_{ТГ}$, мВ/об/мин
75Z	24	14	1,1	450	3000	140	475	5,4
9K/924/0300	24	30	1,8	1000	2900	53,2	627	6,15
9K/660/0355	24	38	2,3	800	4600	59	627	4,23
12Z/594/0400	24	60	3,7	1600	3500	105	2095	5,5
12Z/198/0302	24	92	6,5	800	11000	340	1330	1,8
120	24	140	8,6	3000	4500	95	2510	4

Таблица П.3.49. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии GDM



Продолжение таблицы П.3.49.

Тип двигат.	d_1	d_{25}	d_{30}	d_{35}	d_{20}	d_{21}	d_{22}	d_{23}	l_1	l_{21}	l_{30}	Масса
75Z	7	30	41,5	85	75	30	M3	M3	20	18,5	104	0,48
9K	7	30	41,5	120	92	30	M3	M4	25	18,5	109	0,7
12Z	8	32	42	152	142	32	M3	5,2	24	-	103	1,3
120	10	45	28	140	125	52	M5	M5	27	51,5	130	1,6

Примечание: двигатель 120 имеет на корпусе ребра для охлаждения и паз 3x2 мм на выходном валу для шпонки.

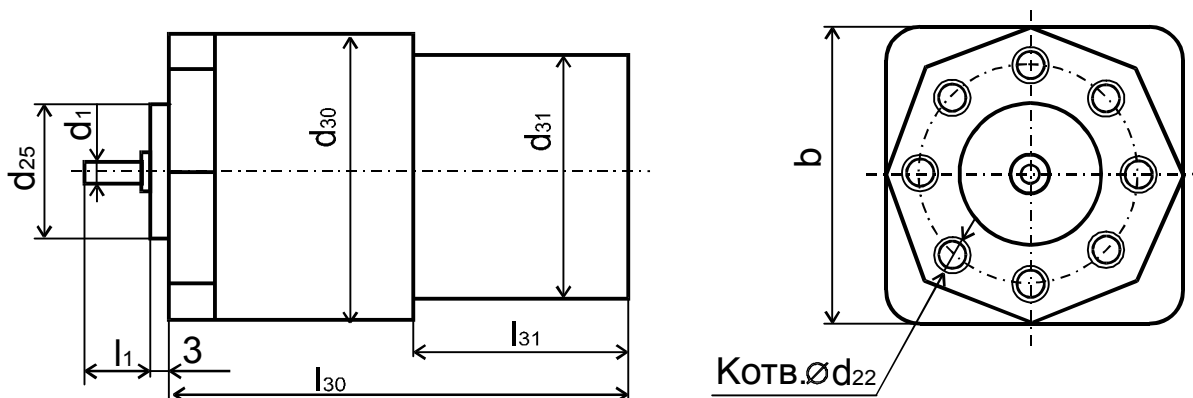
П.3.5.8. Двигатели серии RE.

Двигатели серии RE исполнительные с возбуждением от постоянных магнитов с барабанным ротором со встроенным тахогенератором производства ФРГ. Крепление двигателей – фланцевое.

Таблица П.3.50. Технические данные двигателей серии RE.

Тип двигателя	U_H , В	P_{2H} , Вт	I_H , А	M_H , гсм	$n_{ном}$, об/мин	τ_M , мс	J_P , гсм ²	k_{TG} , мВ/об/мин
110M	22	16	1,8	500	3000	10,8	26	3,6
115F	15	18	2,6	580	3000	7,5	35	2,81
130E	23	39	3	1250	3000	4,9	60	5
220F	24	75	4,7	24005	3000	6,5	195	6
320J	50	157	4,3	000	3000	8,2	825	13,8
340D	55	266	6,2	8500	3000	5,4	1400	16
420F	67	401	7,6	12800	3000	7,3	3500	19,3
430F	98	592	7,3	18900	3000	6	5000	29

Таблица П.3.51. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, двигателей серии RE.



Продолжение таблицы П.3.51.

Тип двигателя	d ₁	d ₂₅	d ₃₀	d ₃₁	d ₂₂	К	b	l ₁	l ₃₀	l ₃₁	Масса
110M	6	25	50	32	M4	6	50	20	95,5	34	0,45
115F	6	25	50	32	M4	6	50	20	111	34	0,54
130E	6	25	50	32	M4	6	50	20	127	34	0,87
220F	9	32	68	43	M5	8	68	25	120	38	1,35
320J	11	50	86	43	M5	8	86	32	145	38	2,5
340D	11	50	86	43	M5	8	86	32	186	38	4,2
420F	11	50	101	43	M5	8	101	32	186	38	3,3
430F	11	50	101	43	M5	8	101	32	220	38	4,5

П.3.5.9. Двигатели TS (производство фирмы Tamagawa Seiki Co., Ltd).

Двигатели TS с пазовым барабанным якорем.

Таблица П.3.52. Технические данные двигателей TS

Тип Двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	R _я , Ом	τ _М , с	J _Р , гсм ²	Масса, кг
TS908	21	5	3750	137	14,3	0,009	9	0,09
N8-E4	21	10	3000	333	6,9	0,007	16	0,15
TS908N8-E3	18,3	10	3300	294	4	0,008	25	0,4
TS688N6-E3	30,8	60	4000	1570	1,7	0,012	284	1,3
TS902N2-E6	31,3	80	4000	1960	1,3	0,012	392	1,5
TS668N4-E6	43	200	3000	6380	1,05	0,018	2340	3
TS906N2-E13								

П.3.5.10. Двигатели OMS (производство фирмы Olympus Opto Electronics Co., Ltd).

Двигатели OMS с беспазовым якорем.

Таблица П.3.53. Технические данные двигателей OMS

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	R _я , Ом	τ _М , с	J _Р , гсм ²
OMS-312	12	3	10500	0,3	5,3	0,01	1,3
	12	5	10500	0,5	3,6	0,01	2,2
OMS-512	24	10	9200	1,3	6,3	0,01	5,8
OMS-1024	24	20	9200	2,5	2,6	0,01	17,3
OMS-2024							

П.3.5.11. Двигатели LN.

Двигатели LN с полым ротором.

Таблица П.3.54. Технические данные двигателей LN

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	R _я , Ом	τ _м , с	J _р , гсм ²	Мас-са, г
LN12-	1,5	0,47	4600	1	8,1	0,027	0,1	10
K91N1	6	4,6	2900	1,5	17,2	0,021	1,5	50
LN20-N1N1	6	7,7	3700	2	7,4	0,015	3,1	70
LN22-M1N1	24	3	1880	14,7	13,5	0,056	80	290
LN40-J2N2	6	13	4350	29	2,2	0,043	22	120
LN30-H21N1	12	29	5700	49	4,7	0,038	27	135
LN30-J31N1								

П.3.6. Бесколлекторные двигатели постоянного тока

П.3.6.1. Двигатели серии БК.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока серии БК – силовые, реверсивные, с встроенным коммутатором. В качестве датчика положения ротора использованы датчики Холла. Для контроля скорости вращения предусмотрен встроенный таходатчик. Режим работы – продолжительный. Напряжение питания – 27 В. Крепление двигателя – фланцевое.

Условия эксплуатации двигателей серии БК:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц

1...2500

ускорение, м/с²

150

Ударные нагрузки, м/с²

400

Температура окружающей среды, °С

-60...+60

Отн. влажн. воздуха при температуре 35°С

98

Гарантийная наработка, час:

10000

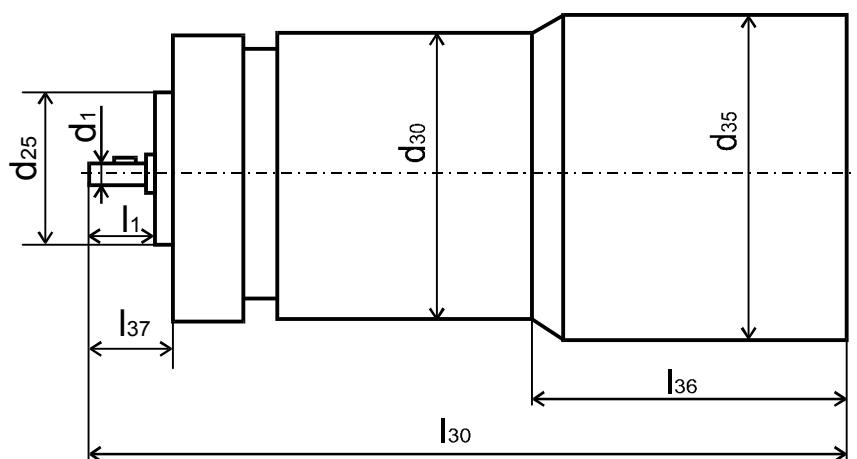
Таблица П.3.55. Технические данные двигателей БК

Тип двигателя	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	I _{НОМ} , А	I _п , А	τ _м , с	КПД %
БК-1316	1,6	6000	0,17	1	0,05	43
БК-1318	1,6	10000	0,17	1,5	0,06	43
БК-1323	1	3000	0,12	0,5	0,03	40
БК-1324	1,6	4000	0,17	1	0,03	43
БК-1414	4	4000	0,3	2,5	0,03	56
БК-1418	6	10000	0,44	3,3	0,07	59
БК-1423	4	3000	0,3	2,7	0,03	53
БК-1424	6	4000	0,44	3,3	0,03	60
БК-1425	6	5000	0,44	3,3	0,03	60
БК-1518	16	10000	1	11	0,09	68
БК-1526	16	6000	1	11	0,04	69

Продолжение таблицы П.3.55.

Тип двигателя	$P_{2НОМ}$, Вт	$n_{НОМ}$, об/мин	$I_{НОМ}$, А	$I_{П}$, А	τ_M , с	КПД %
БК-1533	10	3000	0,6	6	0,03	66
БК-1534	16	4000	1	8,5	0,03	70
БК-1618	40	10000	2,4	30	0,08	72
БК-1626	40	6000	2,3	27	0,05	73
БК-1633	25	3000	1,45	12	0,03	72
БК-1634	40	4000	2,3	20	0,03	73
БК-1818	90	10000	4,9	50	0,12	76
БК-1826	90	6000	4,9	50	0,07	77

Таблица П.3.56. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, двигателей БК



Тип двигат.	d_1	d_{25}	d_{30}	d_{35}	l_1	l_{30}	l_{36}	l_{37}	Масса
БК-1316, 1318	2,8	25	32	36	12	85	48	15	0,21
БК-1323, 1324	2,8	25	32	36	12	90	48	15	0,24
БК-1414, 1418	3,8	32	40	44	14	98	50	17	0,42
БК-1423	3,8	32	40	44	14	105	50	17	0,48
БК-1424, 1425	3,8	32	40	44	14	105	50	17	0,54
БК-1518	4,8	40	50	54	16	112	58	20	0,72
БК-1526	4,8	40	50	54	16	120	58	20	0,84
БК-1533, 1534	4,8	40	50	54	16	132	58	20	1
БК-1618	5,8	50	60	65,5	20	142	75	24	1,2
БК-1626	5,8	50	60	65,5	20	154	75	24	1,5
БК-1633, 1634	5,8	50	60	65,5	20	171	75	24	1,8
БК-1818	7	60	80	87,5	23	169	85	28	2,7
БК-1826	7	60	80	87,5	23	181	85	28	3

П.3.6.2. Двигатели серии ДБ-Д35.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока с синхронизированной скоростью вращения серии ДБ-Д35 – нереверсивные, с коммутатором в виде отдельного блока. Синхронизация может осуществляться двумя способами: внешним управляющим сигналом и от внутреннего генератора, встроенного в коммутатор. Режим работы – продолжительный. Крепление двигателя – фланцевое.

Условия эксплуатации двигателей серии ДБ-Д35:

Вибрационные нагрузки:

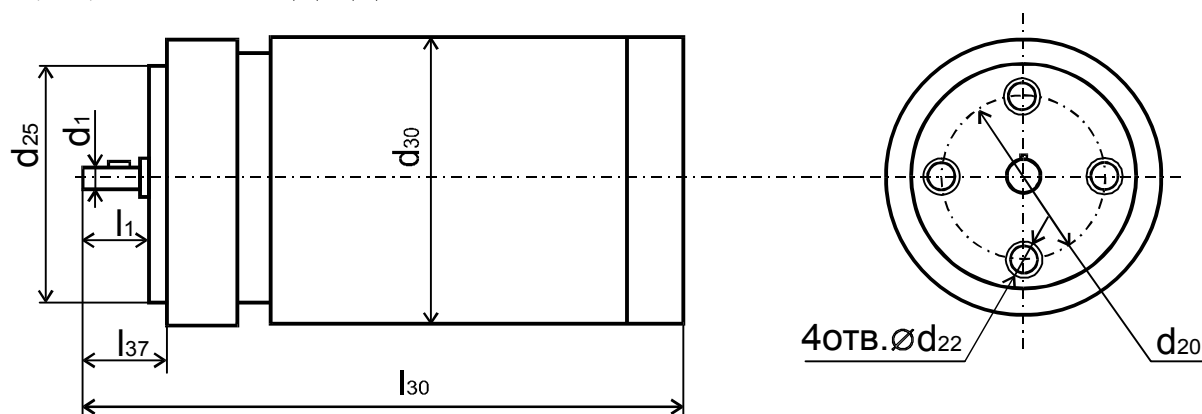
диапазон частот, Гц	1...3000
ускорение, м/с ²	200
Ударные нагрузки, м/с ²	400
Температура окружающей среды, °С	-60...+70
Отн. влажн. воздуха при температуре 35°С	98
Гарантийная наработка, час:	10000

Таблица П.3.57. Технические данные двигателей ДБ-Д35

Тип двигателя	P _{2НО} М, Вт	f _{СИНХР} , Гц	n _{НОМ} , об/мин		I _{НОМ} , А	I _П , А	КПД %
			ВС	ВГ			
ДБ32-1-1	1	90-100	900-1000	1000	0,19	0,6	28
ДБ40-2,5-1	2,5	90-100	900-1000	1000	0,36	1,1	31
ДБ50-4-1	4	90-100	900-1000	1000	0,55	2,4	34
ДБ50-6-1	6	90-100	900-1000	1000	0,68	3,3	39
ДБ25-1-3	1	150-300	1500-3000	3000	0,19	0,6	28
ДБ32-2,5-3	2,5	150-300	1500-3000	3000	0,36	1,1	31
ДБ32-4-3	4	150-300	1500-3000	3000	0,55	2,4	34
ДБ40-6-3	6	150-300	1500-3000	3000	0,68	3,3	39
ДБ40-10-3	10	150-300	1500-3000	3000	1	5,4	44
ДБ50-16-3	16	150-300	1500-3000	3000	1,45	9	49
ДБ50-25-3	25	150-300	1500-3000	3000	2,4	13	53
ДБ25-1-4	1	200-400	2000-4000	4000	0,19	0,6	28
ДБ32-2,5-4	2,5	200-400	2000-4000	4000	0,36	1,1	31
ДБ32-4-4	4	200-400	2000-4000	4000	0,55	2,4	34
ДБ32-6-4	6	200-400	2000-4000	4000	0,68	3,3	39
ДБ40-10-4	10	200-400	2000-4000	4000	1	5,4	44
ДБ40-16-4	16	200-400	2000-4000	4000	1,45	9	49
ДБ50-25-4	25	200-400	2000-4000	4000	2,4	13	53
ДБ25-1-6	1	300-600	3000-6000	6000	0,19	0,6	28
ДБ32-4-6	4	300-600	3000-6000	6000	0,55	2,4	34
ДБ32-6-6	6	300-600	3000-6000	6000	0,68	3,3	39
ДБ32-10-6	10	300-600	3000-6000	6000	1	5,4	44
ДБ40-16-6	16	300-600	3000-6000	6000	1,45	9	49
ДБ40-25-6	25	300-600	3000-6000	6000	2,4	13	53

В таблице обозначено: ВС – синхронизация внешним сигналом; ВГ – синхронизация от внутреннего генератора.

Таблица П.3.58. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, двигателей ДБ-Д35



Тип двигат.	d_1	d_{25}	d_{30}	d_{20}	d_{22}	l_1	l_{37}	l_{30}	Масса
ДБ25-1-6	3	20	25	16	M2	10	13	46	0,11
ДБ25-1-4	3	20	25	16	M2	10	13	51	0,12
ДБ25-2,5-6; 1-3	3	20	25	16	M2	10	13	55	0,14
ДБ32-4-6; 2,5-4	4	25	32	20	M3	12	15	56	0,2
ДБ32-6-6; 4-4; 2,5-3	4	25	32	20	M3	12	15	60	0,22
ДБ32-10-6; 6-4; 4-3; 1-1	4	25	32	20	M3	12	15	66	0,25
ДБ40-16-6; 10-4; 6-3	5	32	40	25	M4	14	17	70	0,38
ДБ40-25-6; 16-4; 10-3; 2,5-1	5	32	40	25	M4	14	17	80	0,45
ДБ50-25-4; 16-3; 4-1	6	40	50	32	M4	16	20	80	0,7
ДБ50-25-3; 4-1	6	40	50	32	M4	16	20	94	0,85
ДБУ32-4-6	4	20	32	24	M3	13	15	80	0,3

Габаритные размеры генератора: для двигателей мощностью 1 и 2,5 Вт – 82x53x38 мм, для двигателей мощностью 4 Вт – 82x75x38 мм, для двигателей мощностью 10, 16 и 25 Вт – 95x82x38 мм.

П.3.6.3. Двигатель ДБУ32-4-6.

Бесколлекторный двигатель постоянного тока ДБУ32-4-6 – управляемый, реверсивный, с коммутатором в виде отдельного блока. Регулирование скорости вращения и реверс осуществляется изменением управляющего напряжения постоянного тока и его полярности. Режим работы – продолжительный. Крепление двигателя – фланцевое.

Условия эксплуатации двигателей серии ДБУ32-4-6:

Вибрационные нагрузки:

диапазон частот, Гц 1...2000

ускорение, m/c^2

двигателя 200

коммутатора 100

Ударные нагрузки, m/c^2

двигателя	750
коммутатора	400
Температура окружающей среды, °С	
двигателя	-60...+70
коммутатора	-10...+55
Отн. влажн. воздуха при температуре 35°С	98
Гарантийная наработка, час:	10000

Технические данные двигателя ДБУ32-4-6:

Напряжение питания, В	24
Максимальное напряжение управления, В	6
Максимальная мощность, Вт	4
Скорость холостого одах, об/мин	6000
Пусковой момент, гсм	220
Ток холостого одах при $U_{упр}=6$ В, А	0,3
Электромеханическая постоянная времени, с	0,04
Кпд, %	30
Масса, коммутатора, кг	0,4
Габариты коммутатора, мм	118x88x33

Габаритные и установочные размеры и масса двигателя ДБУ32-4-6 приведены в таблице П.3.58.

П.3.6.4. Двигатели серии GR.

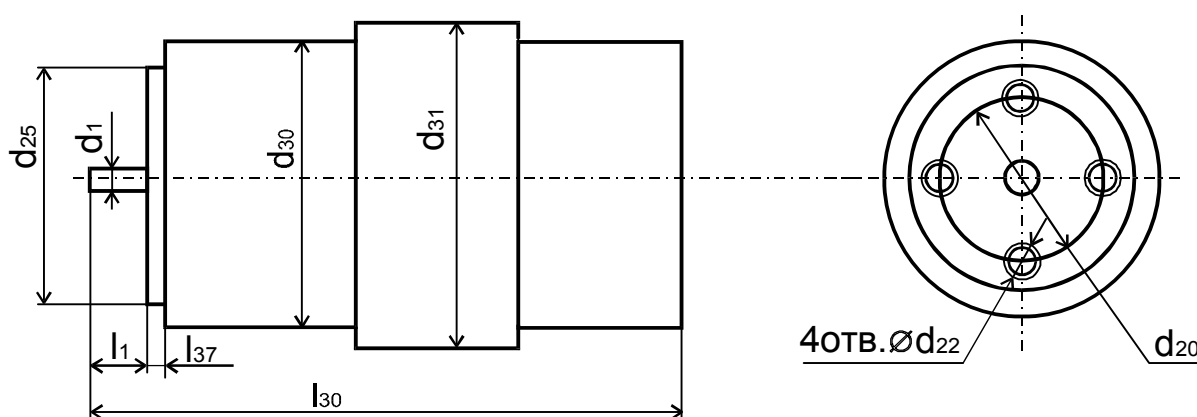
Бесколлекторные исполнительные реверсивные двигатели с встроенным тахогенератором серии GR производства ФРГ – с коммутатором в виде отдельного блока и отдельного трансформатора выпрямителя. Крепление двигателя – фланцевое. Температура окружающей среды -10...45°С, допустимая температура нагрева двигателя - 125°С. Питание двигателей – сетевое однофазное. Коммутатор содержит собственный выпрямитель.

Таблица П.3.59. Технические данные двигателей GR

Тип двигателя	$P_{2НОМ}$, Вт	$n_{НОМ}$, об/мин	$M_{ПУСК}$, гсм	$M_{НОМ}$, гсм	t_1 , мс	t_2 , мс	t_3 , мс
GR1	14	3000	800	450	100	180	90
2M	30	3000	2800	950	17	35	25
GR15M	48	3300	2800	1400	44	85	39
GR18M	94	3000	12500	3000	27	70	42
GR21M	126	3000	16500	4000	34	130	33
GR36M	210	3000	21700	6700	116	133	79
GR41M	289	3000	29000	9200	65	135	70
GR51M							

Примечание. В таблице обозначено: t_1 – время разгона двигателя от 0 до $n_{НОМ}$, t_2 - время разгона двигателя о - $n_{НОМ}$ до + $n_{НОМ}$, t_3 – время торможения от $n_{НОМ}$ до 0.

Таблица П.3.60. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии GR.



Тип двиг.	d_1	d_{25}	d_{30}	d_{31}	d_{20}	d_{22}	l_1	l_{37}	l_{30}	Масса ДВ+ТГ	Масса ком/трансф
12М	4	16	35	38	22	М2	13	2	120	0,4	0,4/0,9
15М	4	18	36	39	28	М3	17	3	122	0,5	0,75/0,9
18М	8	25	63	63	36	М4	25	2	169	1,3	0,4/0,9
21М	6	25	58	58	36	М4	20	3	143	1,6	0,75/2
36М	6	25	58	58	36	М4	20	3	205	2	0,75/2
41М	9	32	63	68	45	М5	25	3	183	1,5	0,75/2
51М	11	50	84	84	68	М5	32	3	248	4,2	1,3/3,5

Габариты коммутатора двигателя GR12М – 180x100x30 мм, GR12М – 194x100x85 мм, остальных типов – 180x100x55 мм.

3.6.5. Двигатели серии AR.

Бесколлекторные исполнительные реверсивные двигатели с встроенным тахогенератором серии AR производства ФРГ – с коммутатором в виде отдельного блока с линейным управлением и отдельного трансформатора выпрямителя. Крепление двигателя – фланцевое.

Температура окружающей среды $-10...45^{\circ}\text{C}$, допустимая температура нагрева двигателя - 125°C . Питание двигателей – сетевое однофазное. Коммутатор содержит собственный выпрямитель.

Таблица П.3.61. Технические данные двигателей GR

Тип двигателя	$P_{2\text{НОМ}}$, Вт	$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	$M_{\text{ПУСК}}$, гсм	$M_{\text{НОМ}}$, гсм	t_1 , мс	t_2 , мс	t_3 , мс
AR1	2,4	3000	30	30	30	100	30
AR2	14	3000	650	450	10	30	10
AR3A	14	3000	-	450	30	50	25
AR3C	25	4500	1000	600	13	29	22

Таблица П.3.62. Габаритные и установочные размеры, мм, и масса двигателей, кг, серии AR (См. габаритный чертеж таблица П.3.60).

Тип двиг	d ₁	d ₂₅	d ₃₀	d ₃₁	d ₂₀	d ₂₂	l ₁	l ₃₇	l ₃₀	Масса дв+ТГ	Масса ком/трнсф
AR1	2	10	22	22	12,7	M2	5,5	1,4	60	0,1	0,5/-
AR2	4	16	35	38	22	M2	13	2	120	0,3	1,1/1,1
AR3A	4	16	35	38	22	M2	13	2	120	0,4	0,8/1,1
AR3C	4	16	35	38	22	M2	13	2	120	0,4	0,8/2

	AR1	AR2	AR3A	AR3C
Габ-ты коммут.	120x72,5x42	160x100x22	232x160x38	160x100x22

П.3.6.6. Двигатели F, PF.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока F, PF четырехполюсные (двухфазные двухтактного типа) производства фирмы Nippon Densan Co.

Таблица П.3.63. Технические данные двигателей F, PF

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	I _{НОМ} , А	Стабильность, %	Температ. диапазон, °С
02FN8C2002	24	1,5	3600	39,2	0,25	1	-5...+55
02FYMF2001	24	0,2	600	19,6	0,15	1	+20...+55
03FN8C4004	24	4	3000	147	0,7	1	-5...+55
03PFNF4004	12	4	4000	98	1,5	0,1	-10...+60
06FN8C4015	24	15	3000	490	2	1	-5...+55
06PNOF4018	24	18	3600	490	2	0,1	0...+40

П.3.6.7. Двигатели 09P18E4036, 091H9C.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока 09P18E4036, 091H9C производства фирмы Nippon Densan Co. Двигатель 09P18E4036 трехфазный с двузполупериодным управлением, двигатели 091H9C трехфазные с однополупериодным управлением.

Таблица П.3.64. Технические данные двигателей 09P18E4036, 091H9C.

Тип двигателя	U, В	P _{2НОМ} , Вт	n _{НОМ} , об/мин	M _{НОМ} , гсм	I _{НОМ} , А	Стабильность, %	Температ. диапазон, °С
09P18E4036	24	36	6000 или 9000 или 12000	294	3,5	0,01	5...45
091H9C4018	24	18	3600	490	2	1	0...50
091H9C4022	24	22	3600	588	2,4	1	0...50

П.3.7. Датчики момента

П.3.7.1. Датчики момента серии ДМ.

Двухфазные индукционные датчики момента серии ДМ с ферромагнитным массивным ротором, покрытым слоем металла с высокой электропроводностью. Конструкция датчиков встроенная, то есть не содержит корпуса.

Таблица П.3.65. Технические данные датчиков момента серии ДМ

Тип ДМ	U_B/U_y , В	$f_{\text{ПИТ}}$, Гц	I_B/I_y , А	$M_{\text{КЗ}}$, гсм	$D_{\text{СТ}}$, мм	$L_{\text{СТ}}$, мм	Масса, г
ДМ-21	40/40	500	0,19/0,12	4	34	14	50
ДМ-41	110/40	500	0,12/0,55	100	66	31	380
ДМ-25	40/40	500	0,19/0,19	14	33	21	70
ДМ-26	25/40	500	0,3/0,3	8	33	25	70
ДМ-45	40/40	500	0,55/0,3	80	68	25	300
ДМ-46	40/40	500	0,5/0,5	25	68	27	270
ДМ-46	40/40	1000	0,25/0,25	50	68	27	270
ДМ-65	40/40	500	0,17/0,17	45	80	17	200
ДМ-66	40/40	1000	0,9/0,9	100	80	34,5	450
ДМ-67	40/140	1000	0,9/0,13	100	80	35,5	450
ДМ-27	40/40	1000	0,25/0,075	5,5	33	30	150
ДМ-49	40/30	1000	0,65/0,35	20	72	17	-

Примечание. В таблице обозначено: $M_{\text{КЗ}}$ – момент при нулевой скорости; $D_{\text{СТ}}$ – посадочный диаметр статора; $L_{\text{СТ}}$ – длина статора с лобовыми частями.

П.3.7.2. Датчики момента серий С, Т и Р.

Датчики момента серий С (производство фирмы Wright), Т и Р (производства фирмы Mechanics for electronics) постоянного тока с ограниченным углом поворота ротора.

Таблица П.3.66. Технические данные датчиков момента серий С, Т и Р.

Тип ДМ	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	Число полюсов	$M_{\text{МАХ}}$, гсм	$\tau_{\text{Э}}$, мс	Масса, кг	L , мм	D , мм
10С	9,5	2	470	0,4	-	-	24,5
18С	35	2	1650	0,7	-	-	45,6
18С	35	4	3360	0,4	-	-	45,6
40С	180	2	7200	5,5	-	-	101,6
40С	180	4	14400	2,8	-	-	101,6
40С	180	6	21600	1,9	-	-	101,6
100С	545	2	25700	20	-	-	254
100С	545	4	51400	10	-	-	254
Т-77	5	-	1380	-	0,27	41,2	51
Т-144	7,2	-	2400	-	0,48	54	51
Р-77	8	-	1000	-	0,27	41,2	51
Р-154	14	-	2000	-	0,48	63,5	51

П.3.7.3. Датчики момента серии Т.

Датчики момента серии Т производства фирмы Inland Motor (США) – постоянного тока, коллекторные, открытые, с естественным охлаждением, многополюсные, с зубчатым ротором с неограниченным углом поворота ротора. Серия рассчитана на эксплуатацию при максимально допустимой температуре окружающей среды до 105 °С.

Таблица П.3.67. Технические данные датчиков момента серий Т.

Тип ДМ	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	$M_{\text{МАХ}}$, гсм	$\tau_{\text{Э}}$, мс	$\tau_{\text{М}}$, мс	Пульсац. мом., %	Масса, кг	L, мм	D, мм
Т-0709	60	460	-	-	7	0,05	14	28
Т-1218	63	1050	0,4	24	7	0,06	13	38
Т-1352	60	1400	0,3	18	7	0,12	13	49
Т-1342	98	2800	-	13,4	7	0,22	13	49
Т-1911	60	4200	0,4	21	5	0,27	22	60
Т-2171	50	8400	1,5	8,6	5	0,71	38	72
Т-2955	77	11500	1,6	17,7	5	0,68	28	95
Т-2950	79	16300	2,1	11,6	5	0,97	34	95
Т-5003	450	82000	0,83	34	7	2,57	39	152
Т-7203	525	$3 \cdot 10^5$	5	14,8	4	8,3	65	229

Литература

1. Брускин Д.Э. и др. Электрические машины и микромашины.–М.: Высшая школа, 1981.–432 с.
2. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств.–М.: Высшая школа, 1988.– 479 с.
3. Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины.–М.: Высшая школа, 1985.–231 с.
4. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами.–М.: Энергоатомиздат, 1989.–181 с.
5. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики.–Л.: Энергоатомиздат, 1985.–364 с.
6. Каасик П.Ю., Блинов И.В. Асинхронные индукторные микродвигатели устройств автоматики.–Л.: Энергоиздат, 1982.–153 с.
7. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока.–М.: Энергоатомиздат, 1989.–224 с.
8. Рабинович Л.В. и др. Проектирование следящих систем.–М.: Машиностроение, 1969.–499 с.
9. Мелкозеров П.С. Энергетический расчет систем автоматического управления и следящих приводов.–М.: Энергия, 1968.–304 с.
10. Преображенский А.А., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники. – М.: Высшая школа, 1982.– 264 с.
11. Копылов И.П., ред. Справочник по электрическим машинам, т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1989.–688 с.

Степанковский Юрий Владимирович

**Преобразующие устройства приборов.
Т1. Электродвигатели (силовые микромашины)**

Редактор Бондарь П.М.

Видавництво “Корнійчук”, 04116, Київ, а/с 4
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів ви-
давничої справи №

Подп. к печати

Бумага газетная

Усл. печ. лист.

Уч.-изд. л.

Тираж

Формат 60x84 1/16

Способ печати офсетный

Заказ №

Фірма “Віпол”
04151, Київ, вул Волинська, 60