

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4

1

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЗМОВ С МАГНИТНОЙ СВЯЗЬЮ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ

1.1. Принцип действия синхронных магнитных механизмов	5
1.2. Конструктивные схемы СММ и рекомендации по их выбору	6

2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЕТЫ СММ

2.1. Расчет одноименно-полюсной реактивной магнитной цилиндрической муфты	26
2.2. Расчет магнитных механизмов поступательного перемещения	46
2.3. Расчет магнитных редукторов	59
2.4. Расчет шаговых редукторов	65
2.5. Расчет переменно-полюсной активной цилиндрической муфты	71
2.6. Расчет механизмов с магнитами из феррита бария или РЗМ	78
2.7. Расчет магнитно-гистерезисной муфты вращения	83
2.8. Проверка расчета магнита с учетом его характеристики и магнитных проводимостей системы	100
2.9. Расчет электромагнитных СММ	116
2.10. Расчет сил одностороннего притяжения элементов СММ	122

3

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ СММ

3.1. Тепловой расчет СММ	124
3.2. Расчет теплопередачи в конструктивных элементах	130
3.3. Расчет воздушного охлаждения и вентилятора	132
3.4. Расчет жидкостного охлаждения	138
3.5. Расчет характеристик СММ	145
3.6. Расчет прочности фланцев экранированных СММ	151
3.7. Расчет прочности экранов и корпусов СММ экранированного исполнения	165

3.8. Расчет допустимой остаточной неуравновешенности роторов. Балансировка роторов	173
3.9. Расчет валов	178
3.10. Расчет прочности полумуфт	187
3.11. Расчет подшипниковых узлов	188

4

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СММ

4.1. Конструкционные магнитно-мягкие стали	197
4.2. Конструкционные немагнитные стали	—
4.3. Конструкционные титановые сплавы	207
4.4. Алюминий и его сплавы	213
4.5. Постоянные магниты	217
4.6. Гистерезисные материалы	231
4.7. Подшипники качения	238
4.8. Контактные щетки	262

5

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

5.1. Классы нагревостойкости изоляции	265
5.2. Пропиточные лаки	—
5.3. Покрывающие лаки и эмали	268
5.4. Компаунды	271
5.5. Конденсаторная бумага	276
5.6. Картон для работы в воздухе	278
5.7. Текстильные материалы из хлопчатобумажных волокон	—
5.8. Стекловолокнистые материалы	280
5.9. Фторопласти	282
5.10. Пропитанные волокнистые материалы	283
5.11. Слоистые пластики	290
5.12. Обмоточные провода	294
5.13. Провода и электроизоляционные материалы высокой нагревостойкости	295

6

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СММ

6.1. Стандарты, используемые при разработке конструкций СММ	305
6.2. Конструкция и размеры выступающих концов валов	306
6.3. Конструкция подшипниковых узлов	316
6.4. Фланцы и уплотнения вакуумных СММ	325
6.5. Фланцы и уплотнения СММ, работающих под давлением	334
6.6. Подшипники скольжения	344
Заключение	357
Список литературы	359
Предметный указатель	361

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электромагнитные и магнитные механизмы, в которых используются силы магнитного притяжения элементов, находят широкое применение в качестве бесконтактных вводов механической энергии в герметичные камеры аппаратов и устройств с высоким давлением или вакуумом; муфт, редукторов, ходовых винтов, шлицевых соединений, демпферных устройств и т. д. Они выполняются в широком диапазоне передаваемых мощностей и частот вращения.

Однако несмотря на ряд имеющихся публикаций комплекс вопросов, связанных с разработкой электромагнитных механизмов, освещен недостаточно. Первой попыткой систематизировать эти вопросы явилась книга «Механизмы с магнитной связью» Л. Б. Ганзбурга и др., но она носила теоретический характер. Отсутствие справочно-методических пособий, освобождающих проектировщика от трудоемких поисков материалов по расчету и конструированию электромагнитных и магнитных механизмов, обусловливает необходимость издания настоящего справочника.

В справочнике приведены рекомендации по выбору конструктивных схем, методы электромагнитных, механических и тепловых расчетов, справочные данные по магнитомягким и магнитотвердым материалам, конструкционным и изоляционным материалам, обмоточным проводам, подшипникам, смазкам и т. д., а также ГОСТы, которые следует учитывать проектировщику. Справочник отражает отечественный опыт разработки магнитных и электромагнитных механизмов разнообразного назначения и различных параметров.

Объем справочника не позволил изложить ряд специфических вопросов, касающихся учета динамики приводов с магнитными механизмами, а также методов конструирования. В справочнике приведены основные материалы, имеющие наиболее важное значение для разработчиков.

Замечания и отзывы просим направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10, издательство «Машиностроение».

ВВЕДЕНИЕ

Синхронные магнитные и электромагнитные механизмы находят все более широкое применение в специальных приборах и электроприводах. Для всех них характерна передача энергии не через механические контакты деталей механизмов, а посредством сил взаимодействия, возникающих при прохождении через элементы механизма магнитного потока. Отсутствие механических контактов создает возможность работы механизмов в вакууме, при высоких и низких температурах, радиации; а также обеспечивает высокий к. п. д., отсутствие износов, уменьшенные шумы.

Синхронные магнитные и электромагнитные механизмы используются в качестве демпферов, динамометров, редукторов, муфт вращения, механизмов поступательного движения. Практически почти любой механизм с механическим взаимодействием элементов можно выполнить бесконтактным с магнитным взаимодействием элементов.

Передача механической энергии магнитным полем и наличие зазора между элементами сделали возможным передачу энергии в герметичные объемы без контактных уплотнений через тонкостенные перегородки — экраны. При наличии внутри аппарата агрессивной или радиоактивной среды, просачивание которой недопустимо, или глубокого вакуума применение подобных экранированных механизмов является идеальным решением, обеспечивающим надежную и безопасную эксплуатацию. В этом качестве экранированные механизмы широко используются для привода герметичных аппаратов (реакторов, насосов, мешалок и т. п.).

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЗМОВ С МАГНИТНОЙ СВЯЗЬЮ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ

1.1

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ МАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Все синхронные магнитные механизмы (СММ) состоят из подвижных ведомой и ведущей частей, являющихся элементами магнитной системы. Ведомая и ведущая части разделены зазором. В рабочем зазоре магнитопроводы ведущей и ведомой частей выполнены с зубцами (у реактивных систем) или полюсами (у активных систем). При этом зубцы или полюсы перпендикулярны направлению перемещения. В магнитно-гистерезисных системах в одной из частей располагается индуктор с полюсами, создающий магнитный поток, в другой — гистерезисный слой (сплошной или шихтованный), в котором наводятся полюсы. При холостом ходе механизма относительное смещение ведущей и ведомой частей отсутствует; существуют лишь силы их взаимного притяжения, действующие радиально.

При появлении движущих сил и наличии сил нагрузки возникает рассогласование осей зубцов или полюсов ведущей и ведомой частей механизма, изменение магнитной проводимости зазора и перераспределение магнитного потока в нем. В результате этого возникает касательная сила, стремящаяся вернуть систему в исходное положение, уменьшить угол рассогласования [11]. При вращении одной из частей механизма синхронно вращается и другая.

Если ведущую часть механизма заключить в герметичную немагнитную оболочку-экран, отделяющую ведущую часть от ведомой и расположенную с зазором относительно подвижных частей, то процесс передачи механической энергии с ведущей части на ведомую происходит так же, как при отсутствии экрана.

При наличии в межзубцовом пространстве герметичной оболочки (экрана) в нем наводятся токи, вызывающие потери и зависящие от сопротивления материала экрана и частоты наведенных токов. Таким образом, величина передаваемых сил в магнитных механизмах зависит от конфигурации зубцовых зон или полюсов, от разности магнитных потенциалов между ними, от параметров материала экрана и скорости движения зубцов или полюсов относительно него.

В гистерезисных муфтах момент создается за счет запаздывания индукции в гистерезисном материале по отношению к намагничивающей силе (н. с.), создаваемой индуктором, при наличии потерь на перемагничивание в гистерезисном слое. Кроме того, при пусках вследствие различия скоростей вращения ведущей и ведомой частей возникает асинхронный момент за счет вихревых токов в гистерезисном слое. Вследствие этой особенности магнитно-гистерезисные муфты обладают естественным пусковым моментом.

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ СММ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ВЫБОРУ

Все СММ классифицируют по следующему ряду признаков, определяющих их конструктивные особенности и свойства:

1) по назначению: муфты вращения; механизмы поступательного перемещения; редукторные механизмы; демпферные устройства; предохранительные муфты; динамометрические муфты; герметичные системы для привода разнообразных устройств (в том числе муфты вращения, редукторы, муфты поступательного перемещения); при использовании оболочки из токопроводящего металла, разделяющей ведущую и ведомую части СММ, герметические системы получили название экранированных СММ;

2) по принципу создания момента: активные, с магнитом или обмотками возбуждения в обоих взаимодействующих элементах, передающие момент в результате взаимодействия магнитов или полюсов; реактивные, с магнитом в одном из взаимодействующих элементов, передающие момент за счет разницы проводимостей при согласованном и рассогласованном положении зубцов; гистерезисные, с магнитом или обмоткой возбуждения в одном из взаимодействующих элементов и гистерезисным слоем в другом;

3) по роду возбуждения (источнику магнитного потока): магнитные [на литых магнитах или с магнитами из феррита бария или редкоземельными (РЗМ)]; электромагнитные, с обмоткой возбуждения постоянного тока;

4) по способу расположения катушки возбуждения или магнитов: с вращающимися или движущимися магнитами или катушкой возбуждения; с неподвижными магнитами или катушкой возбуждения;

5) по исполнению источника магнитного потока: по виду магнита: с магнитом в виде звездочки и с полосовыми магнитами для систем с вращающимися магнитами; с магнитом в виде втулки с осевой намагниченностю;

по виду обмотки возбуждения: многокатушечные, с подвижной обмоткой; с униполярной обмоткой, ось которой совпадает с осью подвижного элемента;

6) по виду рабочей поверхности взаимодействующих элементов: цилиндрические (муфты вращения, редукторы, механизмы поступательного перемещения); торцовые (муфты вращения); червячные (редукторы); плоские (механизмы поступательного перемещения);

7) по числу рабочих зазоров: однозазорные, с однократным использованием магнитного потока; многозазорные, с многократным использованием магнитного потока;

8) по виду магнитного потока в рабочем зазоре: одноименно-полюсные, с постоянной полярностью магнитного потока в зазоре; переменно-полюсные, с чередующейся полярностью магнитного потока в зазоре.

Кроме того, отдельные виды СММ различного назначения могут иметь исполнения, свойственные лишь этим видам. Так, муфты поступательного перемещения могут быть выполнены в модификациях винт—гайка¹ и с поступательным движением полумуфт. Предохранительные

и демпферные муфты на магнитах исполняются с магнитной цепью, обеспечивающей изменение индукции в зазоре, а следовательно, и величины передаваемого момента. Редукторные механизмы могут быть выполнены в следующих модификациях: 1) цилиндрические, червячные, планетарные (с кинематической схемой механических редукторов); 2) с катящимся ротором; 3) шаговые.

Области использования и назначения СММ определяются их свойствами: отсутствием механических контактов, упругостью и возможностью легко изменять жесткость передачи. В связи с этим они могут быть применены в передачах для уменьшения уровня шумов и вибраций. В ряде случаев муфты вращения могут быть использованы как демпферы колебаний, сглаживающие пульсации скорости привода. Возможность электромагнитного управления свойствами муфт: частотными характеристиками, жесткостью — позволяет создать привод со специфическими свойствами.

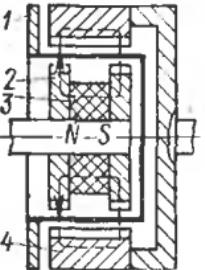
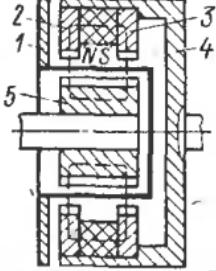
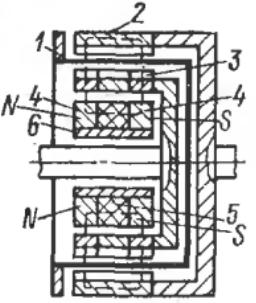
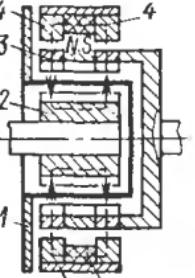
Синхронные магнитные механизмы с электромагнитным возбуждением применяются также для соединения и расцепления валов во время работы механизма. Возможно также использование систем при работе приводов на упор. В этом случае магнитный механизм в конце хода воспринимает выбег механизма до останова. Так как при превышении моментом нагрузки расчетного максимального момента у СММ расцепляются ведущая и ведомая части (происходит срыв), они могут использоваться в качестве предохранительных звеньев в кинематических цепях машин и приборов.

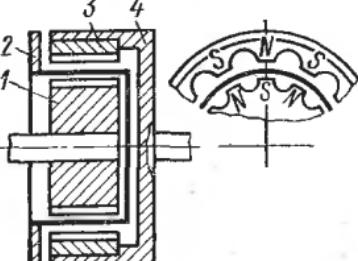
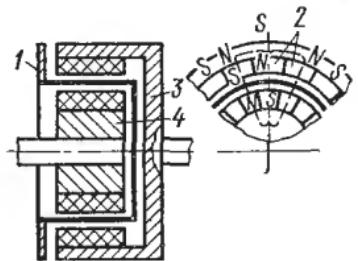
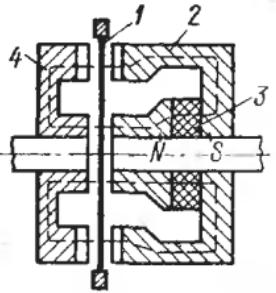
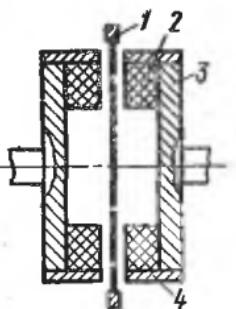
Все СММ могут быть выполнены с разделяющей герметичной оболочкой. Наибольшее распространение получили герметичные (экранированные) муфты вращения. Они используются в следующих приводах: асинхронный (взрывобезопасный) электродвигатель — редуктор — экранированная муфта — исполнительный механизм; асинхронный (взрывобезопасный) электродвигатель — экранированная муфта — исполнительный механизм; регулируемый двигатель постоянного тока (нормального исполнения или капсулированный) — экранированная муфта — исполнительный механизм; ручной привод — экранированная муфта — исполнительный механизм; асинхронный двигатель (двигатель постоянного тока) — мультиплексор — экранированная муфта — исполнительный механизм; механический двигатель (турбина, гидромотор и т. д.) — экранированная муфта — исполнительный механизм.

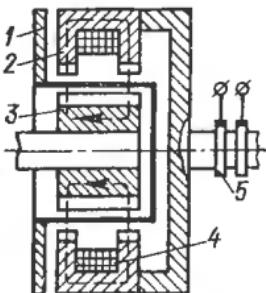
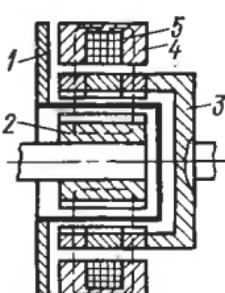
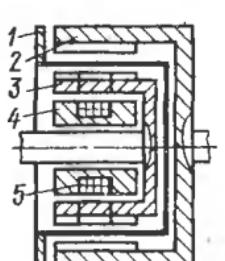
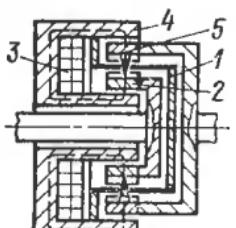
В соответствии с приведенной выше классификацией существует значительное число конструктивных схем СММ. В табл. 1.1 показаны некоторые схемы механизмов в основном экранированного исполнения, однако эти же механизмы могут быть выполнены и без экрана. Выбор той или иной конструктивной схемы определяется назначением механизма и его характеристиками в каждом конкретном случае.

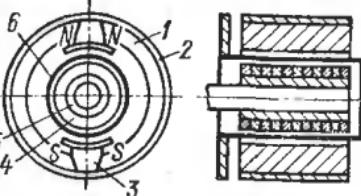
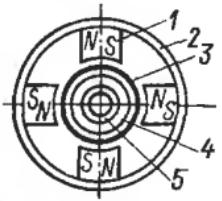
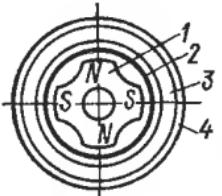
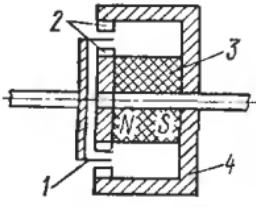
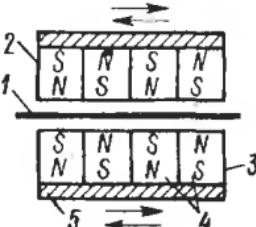
В СММ применяются магниты различной конфигурации. Муфта с магнитом в виде звездочки (схема 5) состоит из немагнитных корпусов полумуфт, содержащих два литых многополюсных магнита. Полясы магнита чередуются, и муфта является переменно-полюсной. Вследствие трудности намагничивания в сборе с остальным магнитопроводом магнит используется не полностью. Индукция в зазоре не превышает 0,3—0,6 Т (в зависимости от материала магнита). Муфта с магнитом в виде звездочки является активной. Эти муфты могут быть рассчитаны на моменты порядка 0,5—2,0 Н·м и частоту вращения до 10 000 об/мин.

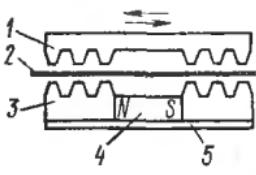
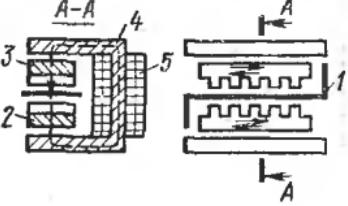
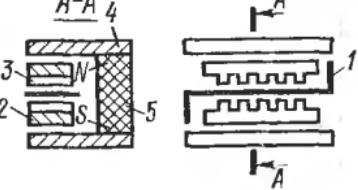
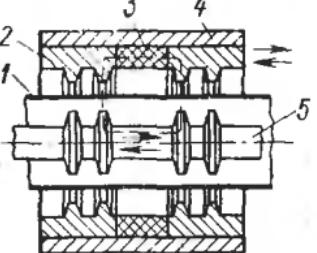
Таблица 1.1. Конструктивные схемы СММ

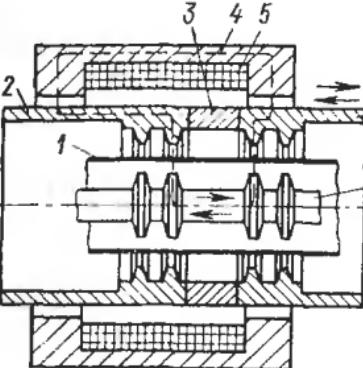
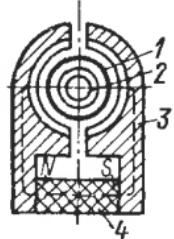
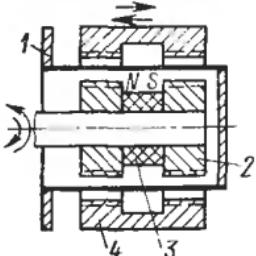
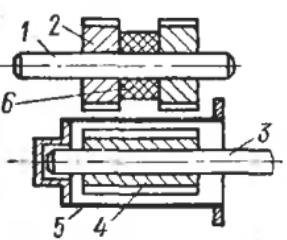
№ п.п.	Конструктивная схема	Характеристика
Муфты вращения		
1		<p>Магнитная, цилиндрическая, реактивная, одноименно-полюсная, с двукратным использованием магнитного потока, с магнитом в виде втулки во внутренней полумуфте: 1 — экран; 2 — полюсная система; 3 — магнит; 4 — наружная полумуфта</p>
2		<p>То же, но с магнитом в наружной полумуфте: 1 — экран; 2 — полюсная система; 3 — магнит; 4 — немагнитный корпус; 5 — внутренняя полумуфта</p>
3		<p>Магнитная, цилиндрическая, реактивная, одноименно-полюсная, с двукратным использованием магнитного потока, с не-подвижным магнитом в виде втулки внутри внутренней полумуфты: 1 — экран; 2 — полумуфта из магнитопроводящего материала; 3 — сварная полумуфта, состоящая из магнитопроводящих зубцовых элементов и немагнитного кольца между ними; 4 — магнитопроводящие кольца; 5 — магнит; 6 — немагнитный корпус</p>
4		<p>То же, но с магнитом снаружи наружной полумуфты</p>

№ п.п.	Конструктивная схема	Характеристика
5		<p>Магнитная, цилиндрическая, активная, переменно-полюсная с магнитами в виде звездочки: 1 и 3 — магниты «звездочка»; 2 — экран; 4 — немагнитный корпус</p>
6		<p>Магнитная, цилиндрическая, активная, переменно-полюсная, с магнитами из феррита бария или РЗМ: 1 — экран; 2 — магнит; 3 — магнитно-мягкий корпус наружной полумуфты; 4 — магнитно-мягкий корпус внутренней полумуфты</p>
7		<p>Магнитная, торцевая, реактивная одноименно-полюсная, с вращающимся магнитом в виде втулки: 1 — экран; 2 — магнитопровод; 3 — магнит; 4 — ведомая полумуфта</p>
8		<p>Магнитная, торцевая, активная, переменно-полюсная, с магнитами из феррита бария или РЗМ: 1 — экран; 2 — магнит; 3 — магнитно-мягкие корпуса полумуфт; 4 — немагнитное кольцо</p>

№ п.п.	Конструктивная схема	Характеристика
9		<p>Электромагнитная, цилиндрическая, одноименно-полюсная, с двукратным использованием магнитного потока, с обмоткой возбуждения в наружной полумуфте: 1 — экран; 2 и 3 — наружная и внутренняя полумуфты; 4 — обмотка возбуждения; 5 — контактные кольца</p>
10		<p>Электромагнитная, цилиндрическая, одноименно-полюсная, с двукратным использованием магнитного потока, с неподвижной обмоткой возбуждения снаружи наружной полумуфты: 1 — экран; 2 — внутренняя полумуфта; 3 — наружная полумуфта, состоящая из зубцовых элементов и немагнитного кольца между ними; 4 — магнитопровод обмотки возбуждения; 5 — обмотка возбуждения</p>
11		<p>То же, с обмоткой возбуждения внутри внутренней полумуфты: 1 — экран; 2 — наружная полумуфта; 3 — внутренняя полумуфта; 4 — магнитопровод обмотки возбуждения; 5 — обмотка возбуждения</p>
12		<p>Электромагнитная, цилиндрическая одноименно-полюсная, реактивная, с однократным использованием магнитного потока, с неподвижной обмоткой возбуждения, расположенной с торца полумуфт: 1 — экран; 2 и 5 — внутренняя и наружная полумуфты; 3 — обмотка возбуждения; 4 — магнитопровод</p>

№ п/п	Конструктивная схема	Характеристика
13		Гистерезисная, цилиндрическая, двухполюсная, с внешним индуктором: 1 — магнит; 2 — корпус; 3 — полюсной наконечник; 4 — гистерезисные слои; 5 — корпус ведомой полумуфты; 6 — экран
14		Гистерезисная, цилиндрическая, с радиальными магнитами во внешней полумуфте: 1 — магнит; 2 — корпус ведущей полумуфты; 3 — экран; 4 — гистерезисные слои; 5 — корпус ведомой полумуфты
15		Гистерезисная, цилиндрическая, с магнитом в виде звездочки во внутренней полумуфте: 1 — магнит «звездочка»; 2 — экран; 3 — гистерезисные слои; 4 — корпус ведомой полумуфты
16		Гистерезисная, цилиндрическая, с тонкостенным гистерезисным ротором: 1 — гистерезисный ротор; 2 — зубцовые элементы, сдвинутые на половину зубцового деления; 3 — магнит; 4 — магнитопривод
17	Механизмы поступательного перемещения 	Магнитный, перемещенно-полюсный, плоский, активный, на магнитах из феррита бария или РЗМ, с поступательным движением ведущей и ведомой частей: 1 и 3 — ведущая и ведомая части; 2 — экран; 4 — магниты; 5 — магнитопроводящие пластины

№ п.п.	Конструктивная схема	Характеристика
18		<p>Магнитный, одноименно-полюсный, плоский, реактивный, с литым магнитом, с поступательным движением ведущей и ведомой частей: 1 — ведущая часть; 2 — экран; 3 — зубцовая зона; 4 — магнит; 5 — немагнитная пластина</p>
19		<p>Электромагнитный, одноименно-полюсный, плоский, реактивный, с неподвижной обмоткой возбуждения: 1 — экран; 2 и 3 — подвижные части; 4 — магнитопровод; 5 — обмотка возбуждения</p>
20		<p>Магнитный, одноименно-полюсный, плоский, реактивный, с неподвижным магнитом, с поступательным движением ведущей и ведомой частей: 1 — экран; 2 и 3 — подвижные части; 4 — магнитопровод; 5 — магнит</p>
21		<p>Магнитный, одноименно-полюсный, цилиндрический, реактивный, с поступательным движением ведущей и ведомой частей: 1 — экран; 2 — полюсные кольца; 3 — магнит; 4 — немагнитный корпус; 5 — ведомая часть</p>

№ п.п.	Конструктивная схема	Характеристика
22		<p>Электромагнитный, одноименно-полюсный, цилиндрический, реактивный, с поступательным движением ведущей и ведомой частей, с неподвижной обмоткой возбуждения: 1 — экран; 2 — полюсные кольца; 3 — немагнитное кольцо; 4 — магнитопровод; 5 — обмотка возбуждения; 6 — ведомая часть</p>
23		<p>Магнитный, цилиндрический, одноименно-полюсный, реактивный, винт—гайка, с поперечным замыканием потока: 1 — экран; 2 — винт; 3 — разрезные части гайки; 4 — магнит</p>
24		<p>То же, но с продольным замыканием магнитного потока: 1 — экран; 2 — полюсы с винтовой зубцовой зоной; 3 — магнит; 4 — гайка</p>
25	<h3 data-bbox="286 1238 819 1278">Редукторные механизмы</h3> 	<p>Магнитный, цилиндрический, с наружным зацеплением: 1 и 2 — ведущие вал и шестерня; 3 и 4 — ведомые вал и шестерни; 5 — экран; 6 — постоянный магнит</p>

№ п.п.	Конструктивная схема	Характеристика
26		Планетарный 2К-Н, магнитный или электромагнитный: 1 — сателлит; 2 — ведущий вал (водило); 3 — постоянный магнит или обмотка возбуждения; 4 — ведомый вал; 5 и 6 — венцы сателлита; 6 и 7 — подвижное и неподвижное главные колеса
27		Червячный, магнитный, с одним постоянным магнитом: 1 — червяк; 2 — немагнитный экран; 3 — разрезное червячное колесо; 4 — кольцевой постоянный магнит
28		Магнитный, шаговый: 1 — ведомый вал с ротором; 2 — неподвижное зубчатое колесо (статор); 3 — ведущий вал; 4 — коммутатор потока

Железоникельалюминиевые магнитные сплавы имеют допустимое напряжение на разрыв 10 МПа, и при допустимой окружной скорости 45 м/с в зависимости от частоты вращения диаметры внутренней полумуфты не должны превышать величин, указанных ниже:

Частота вращения, об/мин	3000	6000	8000	12 000	24 000
Диаметр, см	30	15	10	8	4,5

При окружной скорости внутренней полумуфты 45 м/с и более магнит должен быть бандажирован сварным кольцом со стальными клиньями на полюсах (между полюсами располагаются немагнитные вставки).

Для магнитов муфты используются магнитные сплавы максимальной энергии. Наиболее простой для намагничивания в сборе является двухполюсная модификация муфты с магнитом в виде звездочки. В муфтах с зубцами из полосовых магнитов крепления магнитов к немагнитным

корпусам полумуфт могут быть выполнены с помощью винтов или заливкой алюминием или эпоксидной смолой. В случае, если магнит СММ разъедается средой, его приходится защищать рубашкой из коррозионно-стойкого материала или покрытием. При нарушении синхронизма (срыва) активные муфты с литыми магнитами размагничиваются.

Муфты с барневыми ферритами или РЗМ (см. табл. 1.1, схемы 6, 8)¹ аналогичны муфтам с магнитами в виде звездочки. Они выполняются переменно-полюсными цилиндрическими или торцовыми. Высокая коэрцитивная сила РЗМ и ферритов позволяет создать муфты с большими зазорами. При срывах и разборке муфты не размагничиваются. Недостатками муфт с барневыми ферритами и РЗМ являются небольшие допустимые окружные скорости, необходимость защиты магнита от разрушения при агрессивной среде и вакууме.

Муфты с литыми магнитами в виде втулки (см. табл. 1.1, схемы 1, 2, 3, 4, 7) имеют магнитопроводы и полюсные системы из магнитно-мягкой стали, расположенные по торцам магнита. Зубцовые зоны из стали позволяют легко выполнить оптимальное число зубцов и сконцентрировать магнитный поток в зазоре. Магнит в таких системах может быть смонтирован во внутренней полумуфте, в наружной полумуфте или неподвижно. При больших частотах вращения вращающийся магнит бандажируется по всей длине напрессованным немагнитным кольцом. Муфты являются реактивными. При необходимости защиты от коррозии магнит в реактивных СММ можно установить в немагнитный корпус наружной полумуфты, одновременно являющейся бандажом для магнита. На схемах 3, 4 в табл. 1.1 магнит располагается в немагнитном корпусе, а магнитный поток подводится к полумуфтам кольцами — магнитопроводами. Магнитопроводы необходимо выполнять минимальной длины. Зазоры между ними и вращающейся полумуфтой составляют 0,2—0,3 мм.

Для СММ с постоянными магнитами необходимо проектировать магнитную цепь так, чтобы потоки рассеивания имели минимальную величину, а рабочая точка магнита на кривой размагничивания или линии возврата была как можно ближе к точке максимальной энергии. В связи со сказанным, корпуса СММ конструируются с учетом намагничивания механизма после сборки импульсным способом.

В ряде случаев электромагнитное возбуждение при эксплуатации удобнее использования постоянных магнитов. При частых разборках системы или необходимости отключать ведомый вал от ведущего целесообразны электромагнитные СММ. Конструкции электромагнитных муфт с униполярной обмоткой возбуждения повторяют конструкции магнитных муфт с магнитом в виде втулки, разобранные выше. Если обмотка возбуждения расположена во вращающихся полумуфтах, то питание обмотки производится через контактные кольца (схема 9). Поэтому более целесообразными являются конструкции с неподвижной обмоткой возбуждения (см. табл. 1.1, схемы 10—12). Одна из таких конструкций (схема 10) получила наибольшее применение в муфтах большой мощности (до 240 кВт) и частоте вращения по 60 000 об/мин для герметичных аппаратов, эксплуатируемых в цеховых или лабораторных условиях, а другая (схема 11) используется для тихоходных муфт большой мощности. При больших перепадах давления в экрани-

¹ Авт. свид. № 236155, 218580

рованных системах может быть применено секционирование муфты т. е. выполнение на одном валу нескольких отдельных муфт, объединенных конструктивно в одно целое, или многократное использование магнитного потока при сохранении диаметра полумуфты.

Катушка возбуждения многосекционной муфты в отличие от катушки возбуждения муфты с многократным использованием потока рассчитывается так же, как и у элементарной муфты, а число катушек, как правило, соответствует числу секций.

Механизмы поступательного перемещения могут быть как с плоским экраном (см. табл. 1.1, схемы 17—20), так и с цилиндрическим (см. табл. 1.1, схемы 21—24). В механизмах, изображенных на схемах 17—22, обе части механизма двигаются поступательно. Конструкции механизмов, представленные на схемах 24 и 23, аналогичны конструкции механической пары винт—гайка.

Наиболее простые редукторы¹ показаны на схемах 25 и 27. Недостатком их является малая величина передаваемого момента, обусловленная тем, что в магнитном взаимодействии находится малое число (от двух до четырех) зубцов. Этот недостаток устранен в магнитном редукторе, выполненном по схеме планетарного механического редуктора типа 2К-Н с внутренним зацеплением (см. табл. 1.1, схема 26)². Наличие внутренних зацеплений с малой разностью зубцов обеспечивает возможность передачи большей величины момента в широком диапазоне передаточных отношений.

В приборных передачах применяются шаговые магнитные редукторы (ШМР)³, один из которых показан на схеме 28. В отличие от рассмотренных выше редукторов ШМР имеют дискретный характер движения выходного вала. Ведомый ротор такого редуктора, установленный на валу, выполнен из магнитопроводящего материала и имеет на наружной поверхности два зубчатых венца, взаимодействующих с двумя зубчатыми венцами, выполненными на внутренней поверхности неподвижного статора. Число зубцов ведомого ротора и статора неодинаково и отличается друг от друга на 1—3 зубца. При прохождении магнитного потока ротор занимает положение, обеспечивающее минимальное магнитное сопротивление. Поэтому оси зубцов ротора и статора, находящиеся на оси симметрии коммутатора магнитного потока, совмещены. При повороте коммутатора ось магнитного потока смещается к соседнему зубцу статора. Между зубцами теперь появляется рассогласование, вследствие чего ротор поворачивается на угол, равный разности зубовых делений статора и ротора. При этом оси зубцов ротора и статора вновь совпадут. Из-за малого числа взаимодействующих зубцов ШМР трудно выполнить на большой рабочий момент, вследствие чего область их применения ограничивается приборными кинематическими механизмами. Аналогично работают электромагнитные шаговые редукторы.

Если СММ, имеющие явно выраженные зубцовые элементы, не имеют пускового момента, то гистерезисные муфты имеют пусковой момент. Ведомая муфта, как правило, содержит магнитопроводящие слои из материала с большими потерями на гистерезис; ведущая является индуктором — двух- или многополюсной системой, создающей магнитный поток.

¹ Авт. свид. № 153633, 192576, 274591, 296928; пат. ЧССР № 125725.

² Авт. свид. № 301749.

³ Авт. свид. № 280142, 268811; пат. США № 1.063.330, кл. H02k 51/00.

Муфты могут иметь электромагнитное или магнитное возбуждение. Последние получили преимущественное применение вследствие простоты конструкции, высокой надежности. Наиболее распространеными индукторами являются: индуктор с магнитом в виде звездочки, индуктор с радиальными магнитами, индуктор с магнитом в виде втулки с когтеобразными полюсами. Устройство магнитно-гистерезисных муфт показано на схемах 13—16 (см. табл. 1.1)¹.

Выбор формы и материала герметичной оболочки существенно влияет на работу механизма, так как оболочка воспринимает перепад давлений и при работе механизма ее пересекает врачающееся поле. Материал должен быть механически прочным и коррозионно-стойким к рабочей среде. В металлических токопроводящих оболочках — экранах — при работе индуцируются вихревые токи, тормозящие полу-муфты и уменьшающие передаваемый момент. Поэтому желательно, чтобы материал экрана имел большое электрическое сопротивление и минимальную магнитную проницаемость. Разделяющие оболочки повсеместно изготавливаются из немагнитных механически прочных сталей и сплавов. Толщина экрана определяется также его формой. Плоские и конические экраны имеют большую толщину, чем цилиндрические. Поэтому цилиндрические муфты применяются чаще торцевых. Толщину экрана можно уменьшить, создав в корпусе противодавление, компенсирующее давление под экраном. Чаще для этого уменьшают диаметр экрана. Конструктивно экраны могут выполнятся как сварными, так и цельноточеными. Последние более надежны, но сложны в изготовлении.

При большом перепаде давлений между полостями муфты уменьшение потерь н. с. в рабочем зазоре может быть получено путем использования для экрана магнитопроводящей стали. Однако такой экран шунтирует магнитный поток, в нем велики потери от вихревых токов. Поэтому магнитопроводящий экран может быть использован только в тихоходных передачах. Шунтирование магнитного потока экраном может быть уменьшено или устранено выполнением его из чередующихся полос магнитно-мягкого и немагнитного материалов². Суммарная ширина немагнитных полос между полюсами или зубцами должна быть не менее четырех рабочих зазоров муфты (между зубцами и экраном). В муфтах с двумя или четырьмя полюсами возможно использование экрана из слабомагнитных сталей, однако такой экран также целесообразен лишь для передач с частотой вращения до 50—80 об/мин.

Для улучшения динамических свойств СММ — демпфирования колебаний привода под действием изменяющейся нагрузки при пусках или торможении — могут быть использованы короткозамкнутые обмотки или витки, расположенные на пути магнитного потока. При возникновении колебательного процесса изменяющееся магнитное поле создает в них токи, а следовательно, и магнитные потоки, препятствующие изменению поля. Эти обмотки могут быть выполнены весьма разнообразно. Их можно выполнять в виде беличьих клеток в пазах между зубцами, накладок на полюсы в ферритных муфтах или витков, охватывающих магнитопроводы³.

¹ Авт. свид. № 147644, 281613, 241513, 274566, 254632.

² Авт. свид. № 260719; пат. Франции № 1.346.291, кл. F06d-H02 к.

³ Пат. США № 3.573.517, кл. H02k 49/06.

Рассмотрение конструктивных схем СММ, их достоинств и недостатков позволяет сделать следующие выводы:

1. Для микромуфт, передающих момент до 2,0 Н·м, следует применять схему активной переменно-полюсной муфты с магнитами «звездочка» и преимущественно двухполюсный вариант.

2. Для промышленных систем следует использовать схему реактивной бесконтактной электромагнитной цилиндрической одноименно-полюсной муфты с неподвижной обмоткой возбуждения или муфты из ферритов бария.

3. Для силовых магнитных редукторов следует использовать схему планетарного редуктора типа 2К-Н.

4. Механизмы поступательного перемещения следует выполнять преимущественно цилиндрическими.

На рис. 1.1—1.5 показаны примеры конструкций некоторых муфт. При конструировании магнитных механизмов следует сочетанием деталей из магнитно-мягких сталей и немагнитных сплавов и сталей обеспечивать необходимое замыкание магнитного потока и минимальные потоки рассеивания. Для этого расстояния по прямой между частями магнитопровода разноименной полярности должны быть не менее 10 величин полного воздушного зазора в магнитной цепи. Постоянные магниты должны быть установлены в немагнитные корпуса с возможностью намагничивания магнитов в сборе со всей системой. Катушки возбуждения должны быть охвачены магнитопроводящими магнитопроводами.

В связи с желательностью малых воздушных зазоров следует обратить внимание на необходимость обеспечения достаточной жесткости деталей и на надежность подшипниковых узлов.

При использовании СММ во взрывоопасных помещениях они должны выполняться во взрывозащищенном исполнении. Системы с постоянными магнитами не требуют особых мер по обеспечению взрывозащищенности.

При конструировании СММ с электромагнитным возбуждением необходимо учитывать «Правила изготовления взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» (ПИВРЭ).

Для взрывозащищенных СММ с электромагнитным возбуждением наиболее целесообразно использование конструкций с неподвижными обмотками возбуждения и бесконтактным токоподводом. Простейшим методом взрывозащиты СММ является создание вокруг обмотки возбуждения взрывонепроницаемой оболочки, предотвращающей передачу взрыва при воспламенении смеси внутри ее. В этом случае магнитопровод СММ обычно составляет часть оболочки катушки возбуждения, что упрощает реализацию взрывозащиты.

В соответствии с ГОСТ 183—74 к СММ общего применения, работающим в нормальных условиях, следует предъявлять следующие требования:

1. Отношение максимального врачающего момента или силы к номинальному значению должно быть не ниже 1,65 при номинальных значениях тока возбуждения или н. с. постоянного магнита.

2. Все СММ должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать в течение 2 мин аварийное повышение скорости вращения приводного двигателя на 20% сверх наибольшей, указанной на щите двигателя.

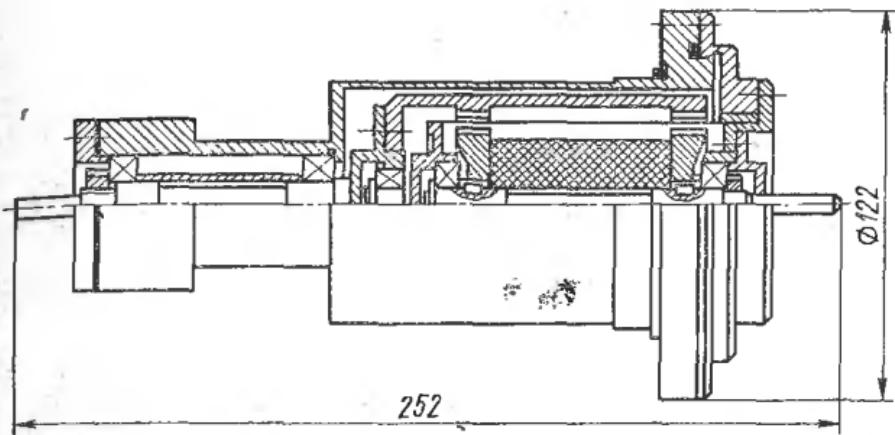


Рис. 1.1. Конструкция магнитной муфты ($M = 1,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$,
 $n = 1000 \text{ об}/\text{мин}$, $\Delta p = 1,5 \cdot 10^{-1} \div 1,01 \cdot 10^{-8} \text{ МПа}$)

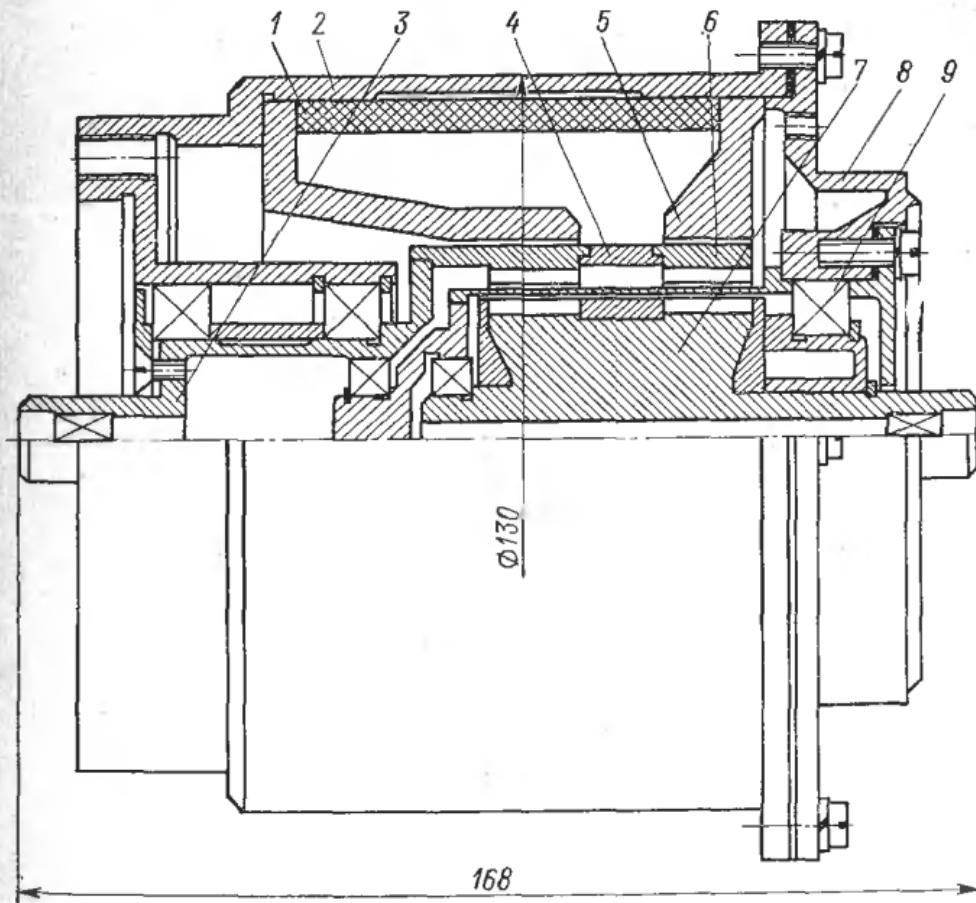


Рис. 1.2. Одноименно-полюсная магнитная муфта с неподвижным магнитом ($N = 1,5 \text{ кВт}$, $n = 15\,000 \text{ об}/\text{мин}$, $\Delta p = 2,525 \text{ МПа}$):

1 — магнит; 2 — корпус; 3 — ведущая полумуфта; 4 — немагнитное кольцо; 5 — кольца-магнитопроводы; 6 — зубцовые элементы ведущей полумуфты; 7 — ведомая полумуфта; 8 — экран; 9 — подшипники

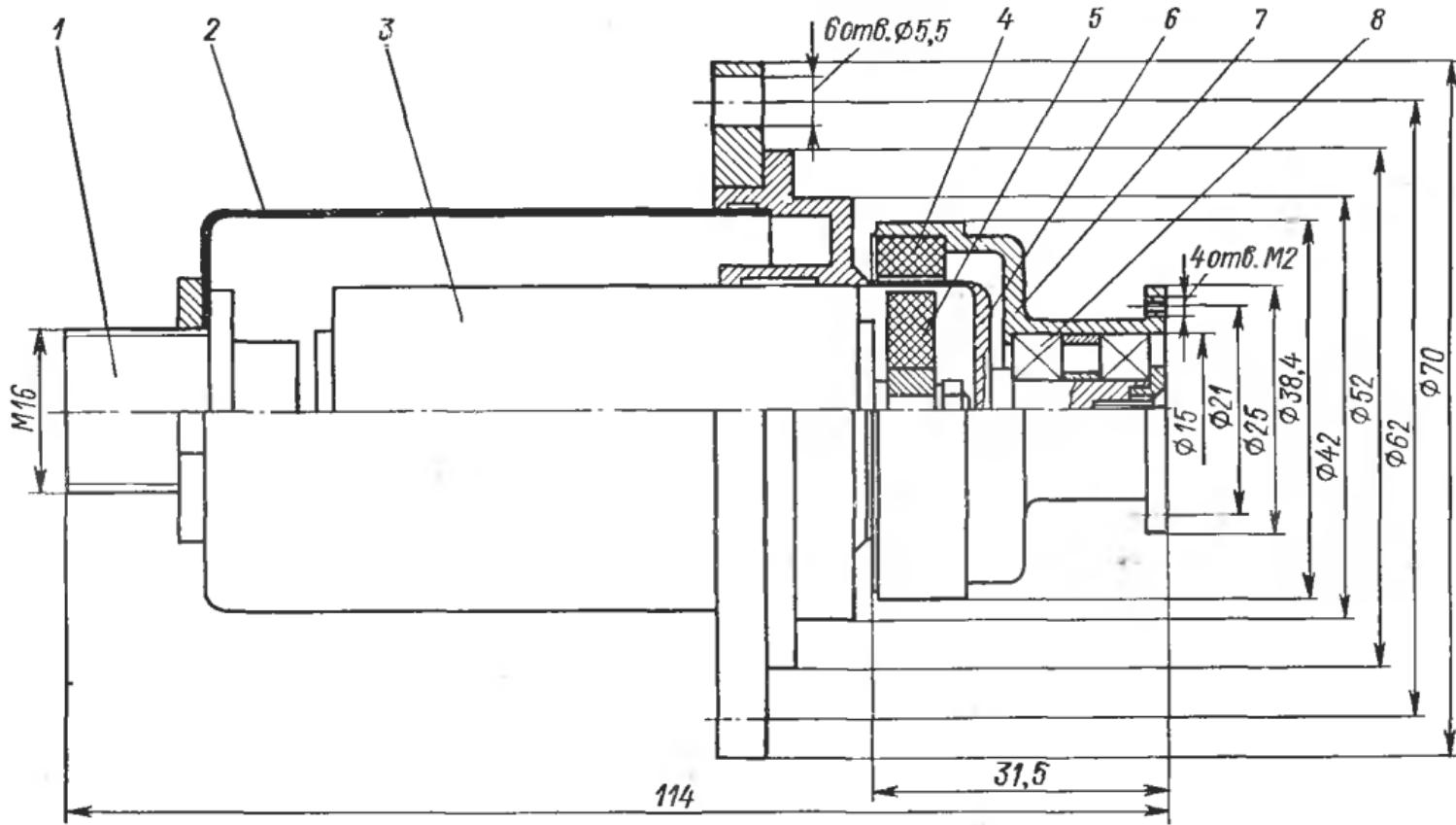


Рис. 1.3. Конструкция микроэлектропривода с двухполюсной экранированной муфтой ($M = 0,5 \text{ Н}\cdot\text{см}$, $n = 6000 \text{ об}/\text{мин}$; $\Delta p = 2 \text{ МПа}$):

1 — стеклянный разъем; 2 — кожух; 3 — электродвигатель; 4 — наружный магнит; 5 — внутренний магнит (ведущая полумуфта); 6 — экран; 7 — корпус наружной полумуфты (ведомой); 8 — подшипники

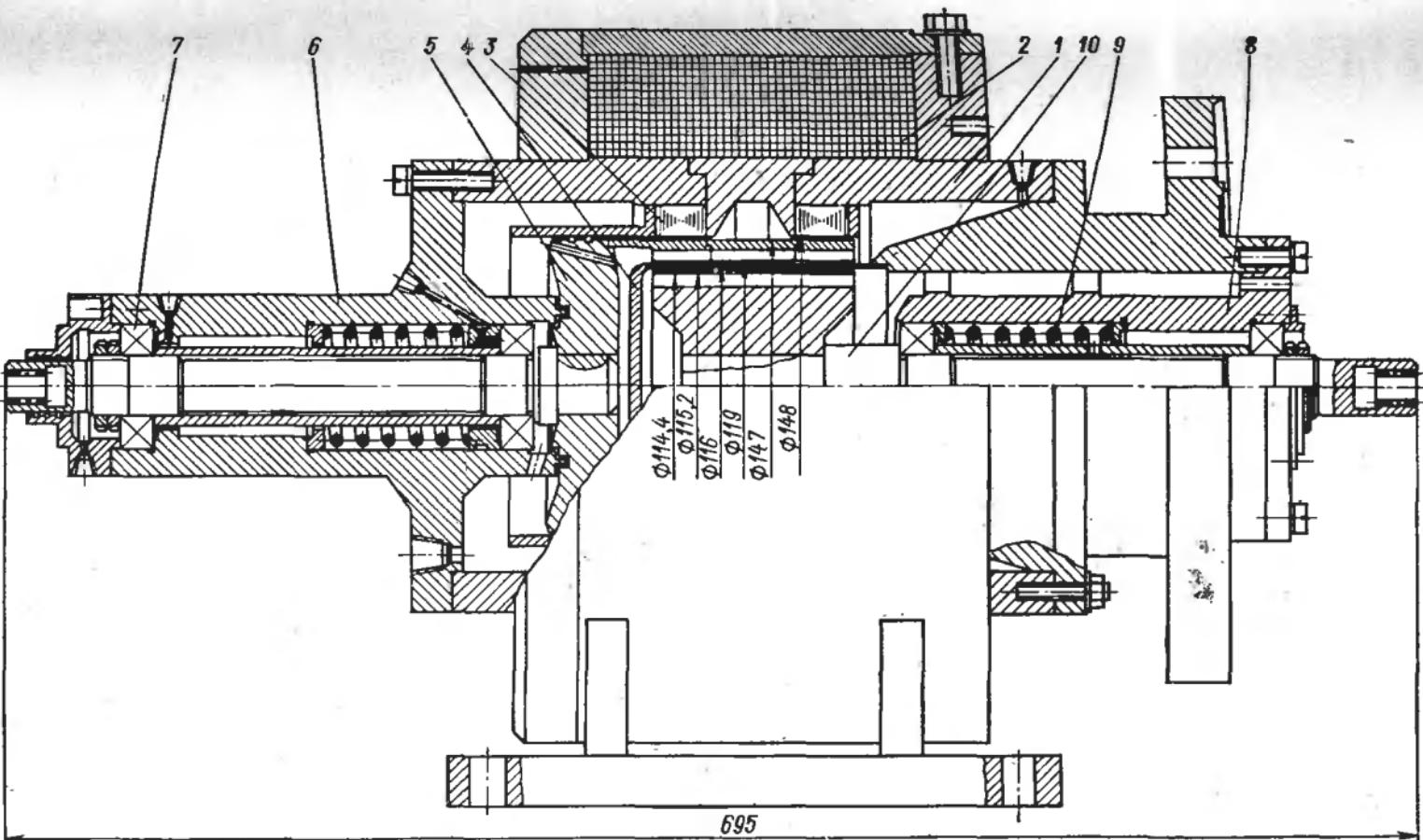


Рис. 1.4. Экранированная муфта ($M = 80$ Н·м, $n = 10\,000$ об/мин, $\Delta p = 0,3$ МПа):

1 — корпус-магнитопровод; 2 — катушка возбуждения; 3 — магнитопровод; 4 — экран; 5 — наружная полумуфта;
6 — корпус подшипников; 7 — подшипники; 8 — проставка; 9 — пружина; 10 — внутренняя полумуфта

3. Температура подшипников не должна превышать следующих предельно допустимых значений: для подшипников скольжения — 80°C (температура масла при этом не должна быть более 65°C); для подшипников качения — 100°C (при температуре окружающей среды не более 40°C). Более высокая температура допускается, если применены специальные подшипники качения или специальные сорта масел при соответствующих материалах вкладышей для подшипников скольжения.

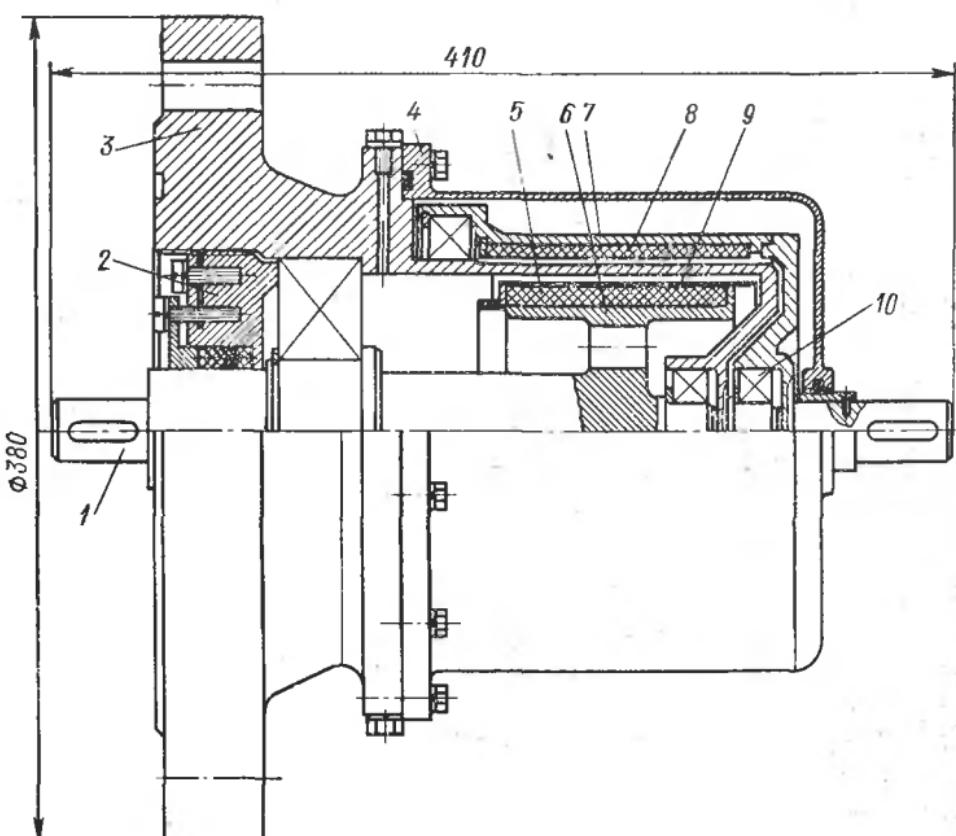


Рис. 1.5. Конструкция экранированной муфты с магнитами из феррита бария ($M = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $\Delta p = 8 \text{ МПа}$, $n = 1500 \text{ об}/\text{мин}$):

1 — несущая часть внутренней полумуфты; 2 — уплотнение; 3 — фланец с экраном; 4 — кожух; 5 и 8 — магниты; 6 и 7 — магнитопроводы; 9 — защитная рубашка внутренней полумуфты; 10 — подшипники

4. Электромагнитные синхронные механизмы должны передавать номинальную мощность при отклонениях напряжения возбуждения от номинального значения в пределах от -5 до $+10\%$. Кратность предельного установившегося напряжения (кратность форсирования) должна быть не более 1,8.

5. Предельные допускаемые превышения температуры частей СММ при температуре окружающей охлаждающей среды 40°C и высоте над уровнем моря до 1000 м должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.2.

Если СММ работают на высоте более 1000 м над уровнем моря и при температуре охлаждающей среды более или менее 40° С, то предельные допускаемые превышения температуры принимать с учетом следующих положений:

Таблица 1.2. Предельные допускаемые превышения температуры частей СММ

Части электромагнитного механизма	Изоляционный материал по ГОСТ 8865-70 класса									
	A	E	B	F	H					
	Предельные допускаемые превышения температуры (°С) при измерении									
	методом термометра	методом со- противления	методом тер- мометра	методом со- противления	методом тер- мометра	методом со- противления	методом тер- мометра	методом со- противления	методом тер- мометра	методом со- противления
Обмотки воз- буждения, имею- щие несколько слоев	60	60	75	75	80	80	100	100	125	125
Сердечники и другие стальные части, соприкаса- ющиеся с обмот- ками	60	—	75	—	80	—	100	—	125	—
Контактные кольца, незащи- щенные и защи- щенные	60	—	70	—	80	—	90	—	100	—

Примечания: 1. Превышение температуры сердечников и других стальных частей, несоприкасающихся с обмотками, не должно создавать опасность повреждения изоляционных или других смежных материалов. 2. Превышение температуры подшипников качения и скольжения составляет соответственно 100 и 80° С.

а) при температуре газообразной охлаждающей среды, более 40° С (но не превышающей 50° С), на каждые 5° с округлением до 5° в сторону увеличения свыше 40° С предельные допускаемые превышения температуры, указанные в табл. 1.2, уменьшить для всех классов изоляционных материалов на 5°; при температуре охлаждающей среды выше 50° С допускаемые превышения температуры нужно устанавливать по согласованию с предприятием-изготовителем;

б) при температуре газообразной охлаждающей среды менее 40° С предельные допускаемые превышения температуры, указанные в табл. 1.2, для всех классов изоляционных материалов можно увеличить соответственно разности между температурой охлаждающей среды и температурой 40° С, но не более чем на 10° С;

в) при установке СММ на высоте над уровнем моря более 1000 м (но не превышающей 4000 м) предельные допускаемые превышения температуры частей СММ следует уменьшить для изоляционных материалов всех классов на 1% на каждые 100 м и сверх 1000 м при условии, что, температура охлаждающей среды будет не выше 40° С.

Т а б л и ц а 1.3. Испытательные напряжения обмоток возбуждения

Мощность СММ и напряжение обмоток возбуждения	Испытательное напряжение (действующее значение)
< 1 кВт на номинальное напряжение < 100 В	500 В плюс двукратное номинальное напряжение
≥ 1 кВт на номинальное напряжение < 100 В	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение
≤ 1000 кВт на номинальное напряжение > 100 В	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение, но не менее 1500 В

Нормальная эксплуатация СММ, рассчитанных для использования на высоте до 1000 м над уровнем моря, возможна, если превышению высоты места установки сверх 1000 м над уровнем моря будет соответствовать снижение температуры газообразной охлаждающей среды по сравнению с 40° С. При этом каждым 100 м превышения высоты места установки СММ сверх 1000 м должно соответствовать снижение температуры газообразной охлаждающей среды не менее чем на 1% от предельных допускаемых превышений температуры, указанных в табл. 1.2.

Для СММ, предназначенных для кратковременного номинального режима работы, допустимые превышения температуры могут быть выше значений, указанных в табл. 1.2, на 10°.

6. Изоляция обмоток возбуждения СММ с электромагнитным возбуждением относительно корпуса должна выдержать без повреждения в течение 1 мин испытательное напряжение частотой 50 Гц, практически синусоидальное, указанное в табл. 1.3. Изоляция обмотки между смежными ее витками должна выдержать в течение 5 мин испытание путем повышения подводимого напряжения на 30% сверх номинального. Для обмоток, рассчитанных на форсирование возбуждения, при котором напряжение превосходит номинальное более чем на 30%, испытание проводят при предельном форсировании напряжения в течение 1 мин. Сопротивление изоляции обмоток возбуждения относительно его корпуса и сопротивление изоляции между обмотками при рабочей температуре СММ должно быть не менее значения, получаемого по формуле (но не менее 0,5 МОм)

$$r = U/(1000 + 0,01P),$$

где r — сопротивление изоляции, МОм; U — номинальное напряжение обмотки, В; P — номинальная мощность СММ, кВт.

7. Электромагнитные синхронные механизмы, как этого требуют правила безопасности эксплуатации электрических установок, должны быть снабжены зажимами для заземления.

Изготовленные СММ подвергаются следующим испытаниям:

- 1) определение максимального вращающего момента или силы;
- 2) испытание при повышенной скорости вращения;
- 3) определение коэффициента полезного действия;
- 4) определение угловой или линейной точности передачи (для СММ с оговоренной точностью);

5) определение начального пускового вращающего момента или сил (для СММ с пусковым моментом);

6) испытания на вибростойкость, на циклическое воздействие температур и влагостойкость;

7) испытание на гидравлическую прочность и герметичность в зависимости от наибольшего рабочего давления (для герметичных СММ);

8) обкаточные испытания.

Для СММ с электромагнитным возбуждением дополнительно проводят испытания:

1) измерение сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса;

2) измерение сопротивления обмотки при постоянном токе в практических холодном состоянии;

3) испытание изоляции обмотки относительно корпуса на электрическую прочность;

4) испытание межвитковой изоляции обмотки на электрическую прочность;

5) определение тока возбуждения.

2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЕТЫ СММ

2.1

РАСЧЕТ ОДНОИМЕННО-ПОЛЮСНОЙ РЕАКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МУФТЫ

Расчет муфты состоит в определении параметров зубцовых элементов, диаметров полумуфт, сечений магнитопровода и магнита. При экранированном исполнении муфты рассчитывается также толщина экрана [11].

Геометрия зубцовых элементов муфты. Работоспособность муфты определяется правильностью выбора размеров и конструкции зубцовых элементов. Наибольшие механические силы при отсутствии в рабочем зазоре токопроводящего экрана передаются полумуфтами при следующих соотношениях величины рабочего воздушного зазора δ , высоты зубца h_z , ширины гребня зубца b_z , ширины паза b_{Π} , зубцового деления τ , числа зубцов z и диаметра внутренней полумуфты D :

$$\delta/\tau = 0,12, \text{ откуда } \tau = 8,35\delta;$$

$$\text{число зубцов полюсной системы } z = \pi D/\tau = 0,376D/\delta, \text{ иначе } z = k_z D/\delta;$$

$$b_z/\tau = k_{bz} = 0,35 \div 0,45; \quad b_{\Pi}/\tau = k_{b\Pi} = 0,65 \div 0,55;$$

$$h_z = (4 \div 4,5) \delta.$$

Форма зубца — трапецидальная, с углом наклона граней зубца $\alpha_z = 10 \div 12^\circ$. Расстояние между разноименно-полюсными зубцовыми зонами $l_{az} = (7 \div 15) \delta$. Схема зубцового элемента показана на рис. 2.1.

Критерием необходимости учета влияния токопроводящего экрана является отношение величины зазора к глубине проникновения индуцированного тока

$$\delta/\Delta = \delta / \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_z \gamma_z}}.$$

Здесь γ_z — удельная электропроводность материала экрана, См/м; μ_z — магнитная проницаемость материала экрана, Г/м; $\omega = 2\pi n z / 60$, где n — частота вращения, об/мин.

При наличии в рабочем зазоре токопроводящего экрана и малых потерях, т. е. $\delta/\Delta \ll 0,1$, геометрию зубцовых элементов можно принять такой же, как в случае без экрана. При $\delta/\Delta \approx 0,1$ или $\delta/\Delta > 0,1$ следует учитывать влияние экрана на геометрию зубцовых элементов и потери в экране. При $\delta/\Delta \ll 0,1$ следует принимать $\delta/\tau = 0,15$, где $\tau = 6,65\delta$; отсюда следует $z = 0,47D/\delta$.

В дальнейшем в формулах для δ/τ , τ , k_z , z , D , Φ значения численных коэффициентов соответствуют: первое граничное значение — экранированной муфте при $\delta/\Delta \ll 0,1$; второе граничное значение — неэкранированной муфте или экранированной при $\delta/\Delta \gg 0,1$.

Обычно при расчетах экранированных систем в качестве исходного соотношения принимается $\delta/\Delta \ll 0,1$, а при дальнейших расчетах определяются параметры системы, обеспечивающие это соотношение. Такой путь расчета обеспечивает минимальную металлоемкость конструкции при наивысшем к. п. д.

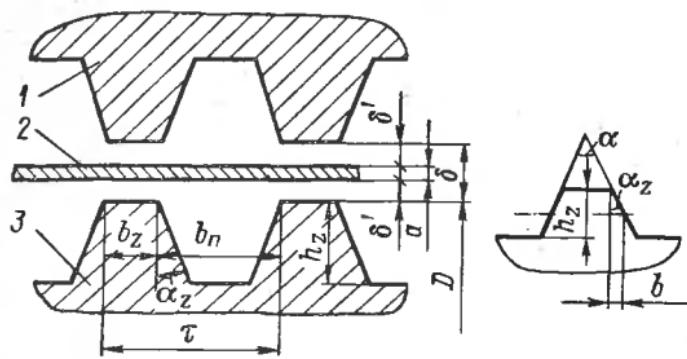


Рис. 2.1. Геометрия зубцовых элементов полумуфт:

1 — наружная полумуфта; 2 — экран; 3 — внутренняя полумуфта (в неэкранированной муфте экран 2 отсутствует)

Угол между боковыми гранями соседних зубцов внутренней полумуфты (рис. 2.2) $\gamma' = 2\gamma_z = 2(\alpha_z + \pi/2)$. При $z > 15$ можно принять $\alpha_z = 12^\circ$. При $z < 15$ грани зубцов наружной полумуфты могут быть параллельными.

В отдельных случаях, когда основным фактором является к. п. д. системы, при допустимом повышении металлоемкости возможен отход от указанных выше соотношений в сторону больших значений δ/τ .

При этом оптимум δ/τ определяется из уравнения $\frac{d\eta}{d(\delta/\tau)} = 0$, где η — к. п. д. механизма.

Коэффициент полезного действия механизма в зависимости от δ/τ может быть записан в виде

$$\eta = \frac{\frac{1}{2k_3 k_{\text{п.м}}} \left[e^{-2,24 \left(\frac{\delta}{\tau} - 0,12 \right)^2} - 0,8857 \right] - k_9 \left(\frac{\delta}{\tau} \right)^{-1}}{\frac{1}{2k_3 k_{\text{п.м}}} \left[e^{-2,24 \left(\frac{\delta}{\tau} - 0,12 \right)^2} - 0,8857 \right] + k_9 \left(\frac{\delta}{\tau} \right)^{-1}},$$

где k_3 — коэффициент запаса по моменту; $k_{\text{п.м}}$ — кратность пускового момента; k_9 — постоянная экрана, зависящая от $(\delta/\Delta)^2$, a/δ и геометрии зубцовых элементов; a — толщина экрана. Расчет величины k_9 приведен ниже.

Определение главных размеров. Главными размерами муфты являются диаметр внутренней полумуфты D и длина зубцов полюсных систем l , так как эти величины определяют величину передаваемого момента. Максимальный передаваемый момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$)

$$M_{\text{эм}} = 0,5\pi D^2 l B_{z\delta}^2 m K / \mu_3.$$

Здесь $B_{z\delta}$ — индукция в рабочем зазоре, Т; μ_3 — магнитная проницаемость экрана, при немагнитном экране $\mu_3 = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Г/м; m —

число рабочих зазоров в муфте; $K = Q - N/2$, где Q — функция синхронизирующей силы, зависящая от геометрии зубцовых элементов; N — функция потерь в экране, зависящая от отношений δ/Δ , a/b и геометрии зубцовых элементов.

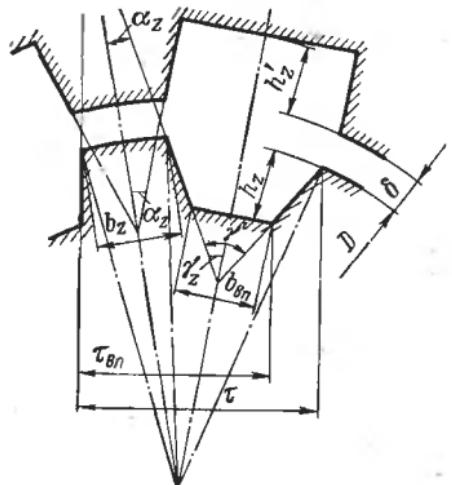


Рис. 2.2. Схема реального зубцового элемента

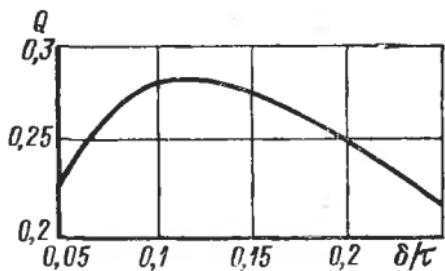


Рис. 2.3. Зависимость Q от δ/τ

Для принятых соотношений размеров зубцовых элементов $Q = 0,028$. График изменения Q в зависимости от δ/τ приведен на рис. 2.3. Наиболее просто с достаточной для практических целей точностью функция N определяется по формуле

$$N = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{a}{\delta} \left(\frac{\delta}{\tau} \right)^{-1} \frac{1}{4\pi} \frac{k_{bz}}{1 + \frac{\pi}{z} \frac{B_{z\delta}}{B_a} k_\Phi k_{bz} (\pi k_{bz} + 2 - 4k_{bz})},$$

где B_a — индукция в стали; k_Φ — коэффициент магнитного потока через паз; z — число зубцов в одном зубцовом элементе. Отсюда зависимость N от δ/τ имеет вид $N = k_3(\delta/\tau)^{-1}$, где

$$k_3 = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{a}{\delta} \frac{1}{4\pi} \frac{k_{bz}}{1 + \frac{\pi}{z} \frac{B_{z\delta}}{B_a} k_\Phi k_{bz} (\pi k_{bz} + 2 - 4k_{bz})}.$$

При нетокопроводящем экране или неэкранированной системе N следует брать равным 0. Значение N может быть определено ориентировочно из выражения $N = N' a/\delta$, где N' — функция потерь в экране при $a/\delta = 1$, зависящая от δ/Δ и δ/τ , график которой показан на рис. 2.4.

Произведение главных размеров (m^3) экранированной муфты рассчитывается по формуле

$$D^2l = 7,64 \cdot 10^{-6} \frac{Pk_3 k_{\text{п. м}}}{nB_{z\delta}^2 m K},$$

где P — передаваемая мощность, Вт; k_3 — коэффициент запаса $k_3 \geq 1,65$.

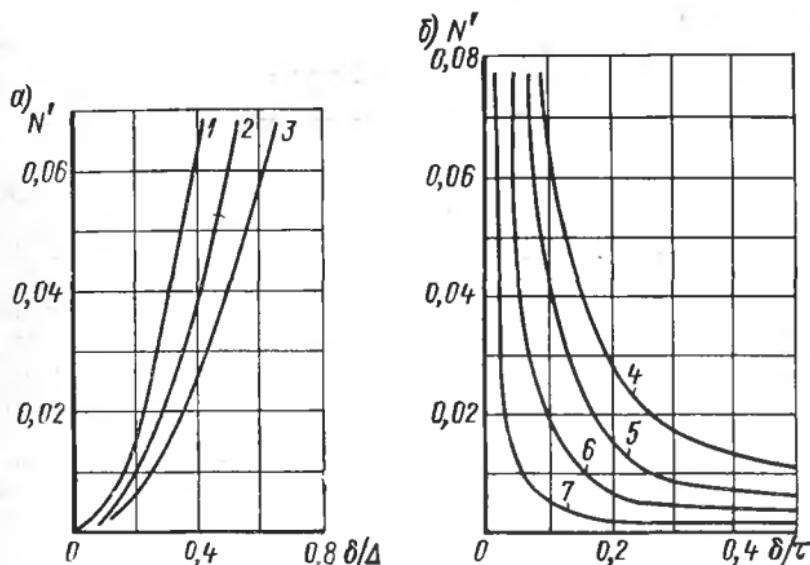


Рис. 2.4. График зависимости N' (δ/τ , δ/Δ) при $a/\delta = 1$:
а — зависимость N' от δ/Δ ; б — зависимость N' от δ/τ ;
1 — $\delta/\tau = 0,1$; 2 — $\delta/\tau = 0,15$; 3 — $\delta/\tau = 0,2$; 4 — $\delta/\Delta = 0,4$;
5 — $\delta/\Delta = 0,3$; 6 — $\delta/\Delta = 0,2$; 7 — $\delta/\Delta = 0,1$

При расчете муфты без экрана, с нетокопроводящим экраном и для предварительных расчетов

$$D^2l = 272,86 \cdot 10^{-6} \frac{Pk_3 k_{\text{п. м}}}{nB_{z\delta}^2 m}.$$

Индукция $B_{z\delta}$ принимается в пределах 0,8—1,5 Т. При индукции $B_{z\delta} \geq 1,5$ Т следует учитывать магнитное насыщение зубцов, увеличивая D^2l на поправочный коэффициент насыщения k_H , значения которого приведены ниже:

$B_{z\delta}$, Т	1,5	1,6	1,7	1,8
k_H	1,03	1,055	1,1	1,15

Величина D^2l определяется моментом и при постоянной мощности более быстроходные системы имеют меньшую массу.

Определение диаметра внутренней полумуфты. Из условия прохождения рабочего магнитного потока через внутреннюю полумуфту

для схем 2, 4, 9, 10 в табл. 1.1, диаметр внутренней полумуфты (м) может быть определен из выражения

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{(26,6 \div 33,4) k_{\Phi} k_{bz} k_z B_{z\delta} (D^2 l)}{\pi B_a}},$$

где k_{Φ} — коэффициент потока через паз, $k_{\Phi} = 1 + \Phi_n / \Phi_z = 1,1 \div 1,3$ при $\delta/\tau = 0,12 \div 0,15$; Φ_n — магнитный поток через паз; Φ_z — магнитный поток через зубец; B_a — индукция в стали внутренней полумуфты.

Для схемы 1 в табл. 1.1.

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{(26,6 \div 33,4) k_{\Phi} k_{bz} k_z B_{z\delta} (D^2 l)}{\pi B_d}} + (8 \div 9) \delta,$$

где B_d — индукция магнита в точке максимальной энергии $(BH)_{\max}$, определяемая по характеристикам магнита. В последней формуле не учтен диаметр вала. Размеры магнита следует проверить при его расчете.

После расчета числа зубцов и зазора необходимо проверить правильность выбора значения N , определив его по формуле $N = N' a / \delta$, где N' определяется из рис. 2.4 по расчетным значениям δ/Δ и δ/τ , а затем откорректировать значение $D^2 l$. Если это сделать не удается, необходимо перейти к конструкции многосекционной муфты.

В ряде случаев толщина экрана и зазор δ' могут быть заданы исходя из условий изготовления, по конструктивным соображениям или по требованиям эксплуатации. В этом случае D определяется по формуле

$$D = \frac{60}{\pi (a + 2\delta') n k_{z\mu_e \gamma_e}} \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2,$$

а число зубцов

$$z = \frac{60}{\pi \delta^2 n \mu_e \gamma_e} \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2.$$

Затем необходимо проверить значение D по условиям прохождения магнитного потока и толщину экрана по прочности. По значениям D и z определяется величина зубцового шага

$$\tau = \pi D / z.$$

Если найденное значение D не обеспечивает прохождение магнитного потока через тело полумуфты (см. табл. 1.1, схемы 2, 4, 9, 10) или размещение магнита необходимого сечения (см. табл. 1.1, схема 1), следует увеличить число рабочих зазоров m и повторить расчет. При конструировании и расчете высокоскоростных муфт диаметр полумуфт определяется расчетом напряжений от центробежных сил. Если определенное таким образом значение $D^2 l$ меньше рассчитанного по передаваемой мощности, необходимо соответственно изменить число рабочих зазоров m и сделать муфту многосекционной, состоящей из нескольких систем, установленных на одном валу и работающих одновременно. Длина зубцов в каждой зоне определяется по магнитному потоку, который пропускает тело внутренней полумуфты,

$$l = \frac{B_a S_{\text{в.м}}}{(6,65 \div 8,35) k_{\Phi} k_{bz} k_z D B_{z\delta}}.$$

где $S_{в.m}$ — площадь сечения внутренней полумуфты на пути магнитного потока.

В ряде случаев при проектировании приводов оговаривается точность угловой передачи при минимальной массе муфты. Момент и угол сдвига зубцов связаны соотношением

$$M = M_{\vartheta_m} \sin 0,5z\gamma/k_{bz},$$

где γ — угол сдвига зубцов; z — число зубцов. Отсюда

$$\frac{M_{\vartheta_m}}{M} = 1 / \sin \frac{0,5z\gamma}{k_{bz}} = k_3.$$

Таким образом, можно подобрать необходимые числа зубцов и коэффициент запаса по моменту. Очевидно, что чем больше эти величины, тем меньший угол рассогласования полумуфт.

Произведение главных размеров (m^4) прецизионной муфты определяется по формуле

$$D^3l = \frac{M\delta k_{bz}}{8,9 \cdot 10^3 B_{z\delta}^2 m\gamma}.$$

Диаметр

$$D = \frac{2\delta' (\Delta p + 2R_z) k_{bz} \arcsin 1/k_3}{\gamma k_z R_z - k_{bz} \Delta p \arcsin 1/k_3}.$$

Расчет магнитной цепи и определение размеров магнита. Магнитная цепь муфты разделяется на следующие участки: рабочий зазор δ ; воздушный конструктивный зазор δ' ; зубцы полюсных систем h_z ; спинка полумуфты и полюсных систем l_a ; магнит l_m .

Исходной величиной для расчета магнитной цепи является магнитный поток. Магнитный поток в рабочем зазоре

$$\Phi_\delta = (6,65 \div 8,35) k_\Phi k_{bz} k_z B_{z\delta} D l.$$

Вследствие рассеяния магнитный поток в магните или сердечнике больше Φ_δ на величину коэффициента рассеяния, т. е. $\Phi = \Phi_\delta \sigma$, где σ — коэффициент рассеяния. По опыту проектирования $\sigma = 1,1 \div 1,3$.

Приняв величину индукции в стали спинки и зубцовых элементов $B_a = 1,2 \div 1,5$ Т и зная величину потока, определяем сечениея спинки и зубцовых элементов $S_a = \Phi/B_a$.

Конструкция и геометрические размеры магнитопроводов выполняются так, чтобы сечение стали на пути магнитного потока везде было равно или больше S_a .

Сечение магнита (m^2) $S_m = \Phi/B_d$, где B_d — индукция магнита, соответствующая $(BH)_{max}$, определяемая по характеристикам магнитного сплава. Длина магнита определяется потерей намагничивающей силы на всех участках магнитопровода. После определения по эскизу муфты длин отдельных участков магнитопровода и зазоров рассчитываются потери н. с., приходящиеся на участки.

Для расчета потери н. с. в зубце определяется индукция в теле зубца на высоте $h_z/3$ от гребня

$$B_z = \Phi_\delta / (l b_{z\text{ср}}).$$

При этом ширина зубца на высоте $h_z/3$ от гребня определится из геометрии зубца

$$b_{z \text{ cp}} = b_z + 2 \frac{h_z}{3} \operatorname{tg} \alpha_z.$$

По кривой намагничивания стали определяется H_z (А/м), соответствующая индукции B_z (Т).

Потери н. с. в зубце (А) $F_z = H_z h_z$, потеря н. с. в спинке полумуфты и зубцовых элементов $F_a = H_a l_a$, где удельные потери н. с. H_a , соответствующие индукции B_a , определяются по кривой намагничивания стали.

При расчете F_a следует учесть, что условие постоянства индукции в стали B_a на всем пути магнитного потока при конструировании практически выдержать трудно, в результате чего в системе существуют участки магнитопровода с индукцией большей или меньшей расчетной. В связи с этим после конструирования магнитной цепи следует проверить величину фактических потерь н. с. в магнитопроводе по участкам,

имеющим отличные от расчетного сечения. В этом случае $F_a = \sum_{i=1}^m l_{ai} H_{ai}$,

причем l_{ai} и H_{ai} определяются по участкам, а H_{ai} соответствует $B_{ai} = \Phi/S_{ai}$.

Потери н. с. на один рабочий зазор $F_{\delta p} = \delta B_{z\delta}/\mu_0$, или $F_{\delta p} = 0,8 \cdot 10^6 \delta B_{z\delta}$.

В муфтах с неподвижным магнитом кроме рабочего зазора существуют конструктивные зазоры с концентрическими поверхностями между магнитопроводом и полумуфтой. Величина индукции в конструктивном зазоре $B_{\delta k}$ определяется формулой $B_{\delta k} = \Phi/S_k$, где S_k — площадь конструктивного зазора. На один конструктивный воздушный зазор приходятся потери н. с. $F_{\delta k} = 0,8 \cdot 10^6 \delta' B_{\delta k}$.

Полная н. с. системы $H_d l_m = \Sigma F$, где H_d — напряженность поля магнита (А/м), соответствующая $(BH)_{\max}$; l_m — длина магнита.

Потери в экране и к. п. д. муфты. Мощность потерь в экране, выделяющаяся в виде тепла,

$$P_\vartheta = 0,5 \pi D_{\text{ср. } \vartheta}^2 / \omega m N B_{z\delta}^2 / \mu_\vartheta.$$

К. п. д. муфты по экрану $\eta_\vartheta = (P - P_\vartheta)/P$. Иначе к. п. д. можно определить по формуле (с учетом k_s и k_m)

$$\eta_\vartheta = \frac{Q/(k_s k_m) - N/2}{Q/(k_s k_m) + N/2}.$$

Ниже приведен порядок расчета муфт по наиболее распространенным расчетным схемам 1—5 (рис. 2.5—2.9, табл. 2.1—2.9) при следующих заданных параметрах: передаваемая мощность P , Вт; частота вращения n , об/мин; кратность пускового момента k_m ; коэффициент запаса k_s ($k_s \geq 1,65$); перепад давлений Δp , Па; материал экрана; удельная электропроводность γ_ϑ , См/м; предел текучести σ_t , МПа; магнитная проницаемость μ_ϑ , Г/м; материал магнита; расчетная индукция B_d , Т (по характеристике магнита); напряженность поля H_d , А/м (по характеристике магнита); рабочая температура муфты t , °С.

Рис. 2.5. Синхронная одноименно - полюсная цилиндрическая муфта с магнитом «втулка» во внутренней полу- муфте (расчетная схема 1)

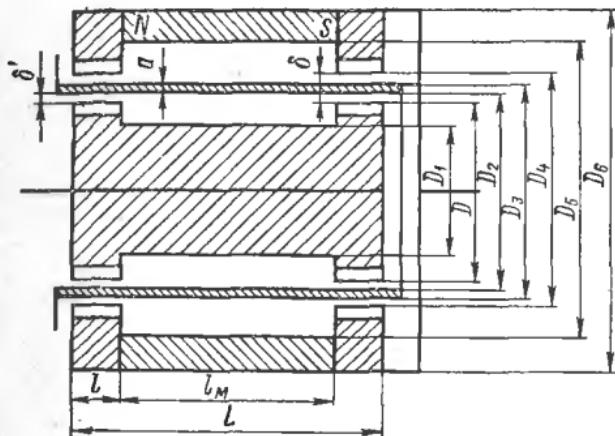
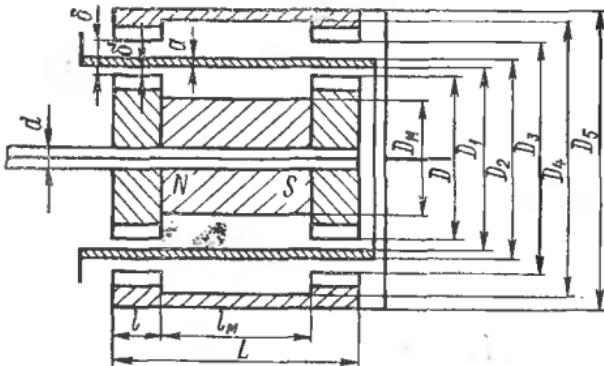


Рис. 2.6. Синхронная одноименно - полюсная цилиндрическая муфта с магнитом в виде кольца в наружной полу- муфте (расчетная схема 2)

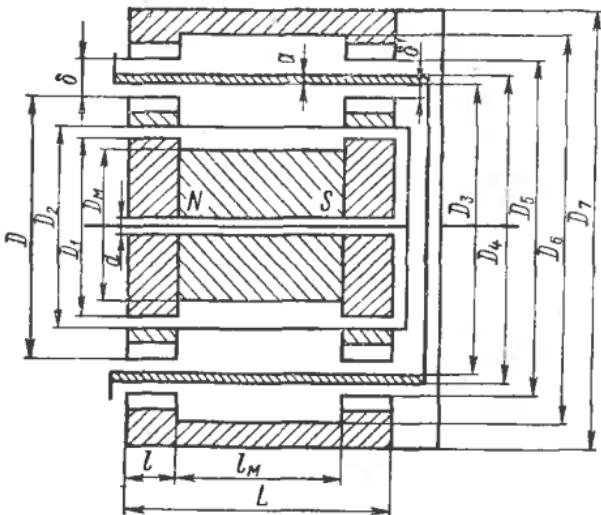


Рис. 2.7. Синхронная одноименно - полюсная цилиндрическая муфта с неподвижным маг- нитом «втулка» вну- три внутренней полу- муфты (расчетная схема 3)

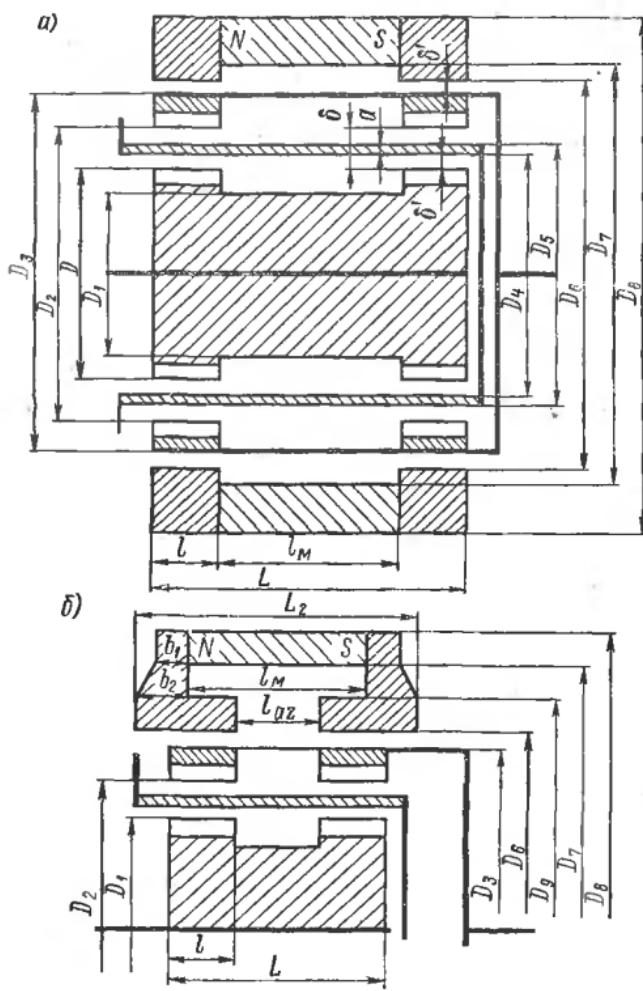


Рис. 2.8. Синхронная одноименно - полюсная цилиндрическая муфта с неподвижным магнитом в виде кольца снаружи наружной полуумфты: а — $l_{az} = l_M$; б — $l_{az} < l_M$ (расчетная схема 4)

Рис. 2.9. Синхронная одноимено - полюсная цилиндрическая муфта с диаметрально намагниченным магнитом (расчетная схема 5)

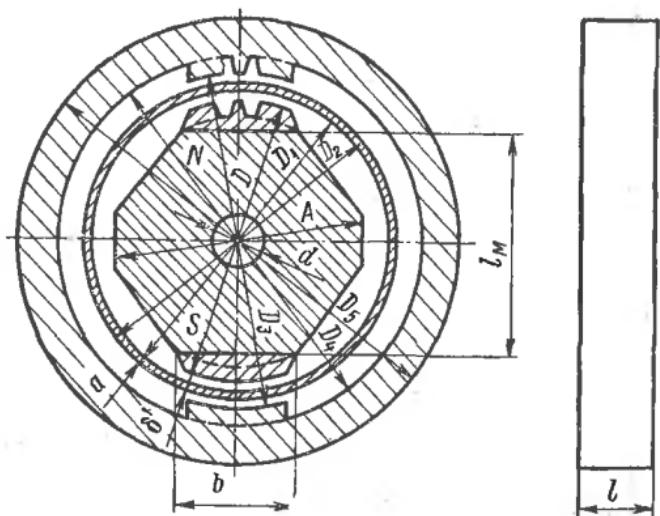


Таблица 2.1. Порядок расчета муфты по схеме 1
(см. рис. 2.5)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Отношение δ/Δ	$\delta/\Delta \leq 0,1$
2	Функция синхронизирующей силы Q	По рис. 2.3
3	Функция потерь в экране N	$\delta/\tau = 0,15 \div 0,12 *$
4	Коэффициент экрана K	$K = Q - N/2$
5	Коэффициент потока через паз k_{Φ}	$k_{\Phi} = 1,1 \div 1,3$
6	Коэффициент гребня зуба k_{bz}	$k_{bz} = 0,35 \div 0,45$
7	Коэффициент числа зубцов * k_z	$k_z = 0,47 \div 0,38$
8	Индукция над зубцом $B_{z\delta}$, Т	$B_{z\delta} = 0,8 \div 1,5$
9	Коэффициент насыщения k_h	См. стр. 29
10	Число рабочих зазоров m	2
11	Произведение главных размеров D^2l , м ³	$D^2l = 7,64 \cdot 10^{-6} \frac{Pk_3k_Mk_h}{nB_{z\delta}^2mK}$
12	Толщина экрана a , м	По методике (см. п. 3.7) или по конструктивным соображениям
13	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
14	Величина рабочего зазора δ , м	$\delta = a + 2\delta'$
15	Диаметр внутренней полумуфты * D , м	$D \geq (8 \div 9) \delta + \sqrt[3]{(26,6 \div 33,4) k_{\Phi} k_{bz} k_z B_{z\delta} (D^2l)} / \pi B_d$
16	Длина зубца в зубцовом элементе l , м	$l = (D^2l)/D^2$
17	Зубцовое деление * τ , м	$\tau = (6,65 \div 8,35) \delta$
18	Число зубцов z	$z = \pi D / \tau$
19	Отношение a/δ	См. п. 12, 14
20	Глубина проникновения тока в экран Δ , м	$\Delta = \sqrt{\frac{60}{\mu_0 \sigma \mu_0 \gamma_e}}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м (при немагнитном экране)
21	Отношение δ/Δ	См. п. 14, 20

№ п.п.	Параметр	Формула
22	Функция N' при $a/\delta = 1$	По рис. 2.4
23	Значение N	$N = N' a/\delta$
24	Ширина гребня зубца b_z , м	$b_z = k_{b_z} \tau$
25	Высота зубца h_z , м	$h_z = (4 \div 4,5) \delta$
26	Расстояние между зубцовыми зонами l_{az} , м	$l_{az} \geq (7 \div 15) \delta$
27	Угол между гранями зубца $2\alpha_z$, °	$2\alpha_z = 20 \div 24$
28	Магнитный поток в рабочем зазоре * Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = (6,65 \div 8,35) k_\Phi \times k_{b_z} k_z D l B_{z\delta}$
29	Коэффициент рассеяния потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
30	Поток в магните Φ_m , Вб	$\Phi_m = \Phi_\delta \sigma$
31	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
32	Сечение магнитопровода S_a , м ²	$S_a = \Phi_\delta / B_a$
33	Сечение магнита S_m , м ²	$S_m = \Phi_m / B_d$
34	Диаметр вала d , м	По методике (см. п. 3.9) или по конструктивным соображениям
35	Диаметр магнита D_m , м	$D_m = \sqrt{(S_m - \pi d^2/4) 4/\pi}$
36	Поток через зубец Φ_z , Вб	$\Phi_z = B_{z\delta} b_z l$
37	Ширина зубца на высоте $1/3$ от гребня $b_{z\text{cp}}$, м	$b_{z\text{cp}} = b_z + 2 \frac{h_z}{3} \operatorname{tg} \alpha_z$
38	Расчетная индукция в зубце B_z , Т	$B_z = \Phi_z / (l b_{z\text{cp}})$
39	Напряженность, соответствующая индукции B_z , H_z , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
40	Потеря н. с. в зубце F_z , А	$F_z = H_z h_z$
41	Напряженность, соответствующая индукции B_a , H_a , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
42	Длина пути магнитного потока в магнитопроводе l_a , м	По эскизу муфты

№ п.п.	Параметр	Формула
43	Потери н. с. в магнитопроводе F_a , А	$F_a = H_a l_a$
44	Потери н. с. на один рабочий зазор $F_{\delta p}$, А	$F_{\delta p} = 0,88 B_{z0} 10^6$
45	Полная н. с. системы $\sum F$, А	$\sum F = 4F_z + F_a + 2F_{\delta p}$
46	Длина магнита l_m , м	$l_m = \sum F / H_d$
47	Коэффициент полезного действия муфты $\eta_{\text{экпр}}$	$\eta_{\text{экпр}} = \frac{Q/(k_3 k_m) - 0,5N}{Q/(k_3 k_m) + 0,5N}$
48	Проверка величины диаметра D , м	$D \geq D_m + 2h_z$
49	Размеры муфты, м	$D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a;$ $D_3 = D_2 + 2\delta'; D_4 = D_3 + 2h_z +$ $+ (1 \div 3) 10^{-3}; D_5 =$ $= \sqrt{(S_a + \pi D_4^2 / 4) 4 / \pi}; L = l_m + 2l$

П р и м е ч а н и я: 1. Расчет толщины экрана a и диаметра D производится последовательными приближениями. Окончательный проверочный расчет прочности экрана должен быть произведен после определения всех размеров муфты. 2. При проверке значения N по приведенному в п. 23 необходимо сравнить полученное значение с принятым в п. 3. При большой разнице их значений необходимо повторить расчет, изменив полученные ранее значения D и l . Так же последовательным приближением корректируется величина l_a по l_m . В неэкранированных системах $N = 0$; п. 1, 3, 19—23 из расчета исключаются.

* Первое граничное значение относится к экранированной муфте с $\delta/\Delta \leq 0,1$ (до 0,05); второе — к неэкранированной или к экранированной с $\delta/\Delta \ll 0,1$.

Т а б л и ц а 2.2. Порядок расчета муфты по схеме 1 при заданных величинах a и δ' (см. рис. 2.5)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Толщина экрана a , м	По конструктивным соображениям
2	Конструктивный зазор δ' , м	» » »
3	Величина рабочего зазора δ , м	$\delta = a + 2\delta'$

№ п.п.	Параметр	Формула
4	Отношение δ/Δ	$\delta/\Delta \leq 0,1$
5	Коэффициент числа зубцов k_z	$k_z = 0,47 \div 0,38$
6	Диаметр внутренней полумуфты D , м	$D \leq \frac{60}{\pi \delta n k_z \mu_3 \gamma_3} \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2$
7	Число зубцов z	$z = \frac{60}{\pi \delta^2 n \mu_3 \gamma_3} \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2$
8	Проверка толщины экрана a по давлению, м	По методике (см. п. 3.7)
9	Функция синхронизирующей силы Q	По рис. 2.3
10	Отношение a/δ	См. п. 1,3
11	Функция N' при $a/\delta = 1$	По рис. 2.4, $\delta/\tau = 0,15 \div 0,12$
12	Функция потерь в экране N	$N = N' a/\delta$
13	Коэффициент экрана K	$K = Q - N/2$
14	Коэффициент потока через паз k_Φ	$k_\Phi = 1,1 \div 1,3$
15	Коэффициент гребня зубца k_{bz}	$k_{bz} = 0,35 \div 0,45$
16	Зубцовое деление τ , м	$\tau = \pi D/z$
17	Ширина гребня зубца b_z , м	$b_z = k_{bz} \tau$
18	Высота зубца h_z , м	$h_z = (3,5 \div 4,5) \delta$
19	Расстояние между зубцовыми элементами l_{az} , м	$l_{az} = (7 \div 15) \delta$
20	Угол между гранями зубца $2\alpha_z$, ...	$2\alpha_z = 20 \div 24$
21	Диаметр магнита D_m , м	$D_m = D - (8 \div 9) \delta$
22	Диаметр вала d , м	По методике (см. п. 3.9) или по конструктивным соображениям
23	Сечение магнита S_m , м ²	$S_m = \pi D_m^2 / 4 - \pi d^2 / 4$
24	Поток в магните Φ_m , Вб	$\Phi_m = S_m B_d$
25	Коэффициент рассеяния магнитного потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
26	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = \Phi_m / \sigma$
27	Индукция над зубцом $B_{z\delta}$, Т	$B_{z\delta} = 0,8 \div 1,5$

№ п.п.	Параметр	Формула
28	Длина зубца в зубцовом элементе l , м	$l = \frac{\Phi_\delta}{(6,65 \div 8,35) k_\Phi k_{bz} k_z DB_{z\delta}}$
29	Коэффициент насыщения k_n	См. стр. 29
30	Число рабочих зазоров m (m — целое четное)	$m = \frac{7,64 \cdot 10^{-6} P k_3 k_M k_n}{n B_{z\delta}^2 K D^2 l}$
31	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
32	Сечение магнитопровода S_a , м ²	$S_a = \Phi_\delta / B_a$
33	Поток через зубец Φ_z , Вб	$\Phi_z = B_{z\delta} b_z l$
34	Ширина зубца на высоте $1/3$ от гребня $b_{z\text{ср}}$, м	$b_{z\text{ср}} = b_z + 2 \frac{h_z}{3} \operatorname{tg} \alpha_z$
35	Расчетная индукция в зубце B_z , Т	$B_z = \Phi_z / (l b_{z\text{ср}})$
36	Напряженность, соответствующая индукции B_z , H_z , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
37	Потеря н. с. в зубце F_z , А	$F_z = H_z h_z$
38	Напряженность, соответствующая индукции B_a , H_a , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
39	Длина пути магнитного потока в магнитопроводе l_a , м	По эскизу муфты
40	Потери н. с. в магнитопроводе F_a , А	$F_a = H_a l_a$
41	Потери н. с. на один рабочий зазор $F_{\delta p}$, А	$F_{\delta p} = 0,8 \delta B_{z\delta} 10^6$
42	Полная н. с. системы $\sum F$, А	$\sum F = 4F_z + F_a + 2F_{\delta p}$
43	Длина магнита l_m , м	$l_m = \sum F / H_d$
44	Коэффициент полезного действия муфты, $\eta_{\text{экп}}$	$\eta_{\text{экп}} = \frac{Q/(k_3 k_M) - 0,5N}{Q/(k_3 k_M) + 0,5N}$

№ п.п.	Параметр	Формула
45	Размеры муфты, м	$D_1 = D + 2\delta'; \quad D_2 = D_1 + 2a;$ $D_3 = D_2 + 2\delta'; \quad D_4 = D_3 + 2h_z +$ $+ (1 \div 3) 10^{-3}; \quad D_5 =$ $= \sqrt{(S_a + \pi D_4^2 / 4) 4 / \pi}; \quad L = l_m + 2l$

П р и м е ч а н и я: 1. При получении в расчете дробного числа m следует изменить D и l до получения целого числа m . 2. Величина l_a последовательным приближением корректируется по l_m . 3. Окончательный проверочный расчет экрана должен быть произведен после определения всех размеров муфты.

Т а б л и ц а 2.3. Порядок расчета муфты по схеме 2
(см. рис. 2.6)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—14	См. табл. 2.1, п. 1—14	—
15	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
16	Диаметр внутренней полумуфты D , м	$D \geq (8 \div 9) \delta + (1 \div 2) 10^{-3} +$ $+ \sqrt{\frac{(26,6 \div 33,4) k_{\Phi} k_{b2} k_z B_{z\delta} (D^2 l)}{\pi B_a}}$
17—31	См. табл. 2.1, п. 16—30	—
32—33	См. табл. 2.1, п. 32—33	—
34—45	См. табл. 2.1, п. 36—47	—
46	Размеры муфты, м	$D_1 = D - 2h_z - (1 \div 2) 10^{-3};$ $D_2 = D + 2\delta'; \quad D_3 = D_2 + 2a;$ $D_4 = D_3 + 2\delta'; \quad D_5 = D_4 + 2h_z;$ $D_6 = \sqrt{(\pi D_5^2 / 4 + S_m) 4 / \pi}; \quad L =$ $= l_m + 2l$

П р и м е ч а н и е. См. примечания к табл. 2.1.

Таблица 2.4. Порядок расчета муфты по схеме 2
при заданных величинах a , δ' (см. рис. 2.6)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—20	См. табл. 2.2, п. 1—20	
21	Диаметр D_1 , м	$D_1 = D - (8 \div 9) \delta - (1 \div 2) 10^{-3}$
22	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
23	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = B_a \pi D_1^2 / 4$
24—27	См. табл. 2.2, п. 27—30	
28	Коэффициент рассеяния потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
29	Поток в магните Φ_M , Вб	$\Phi_M = \sigma \Phi_\delta$
30	Сечение магнита S_M , м ²	$S_M = \Phi_M / B_d$
31—42	См. табл. 2.2, п. 33—44	
43	Размеры муфты, м	$D_2 = D + 2\delta'; D_3 = D_2 + 2a;$ $D_4 = D_3 + 2\delta'; D_5 = D_4 + 2h_z;$ $D_6 = \sqrt{(\pi D_5^2 / 4 + S_M) 4 / \pi}; L = l_M + 2l$

Примечание. См. примечания к табл. 2.2.

Таблица 2.5. Порядок расчета муфты по схеме 3
(см. рис. 2.7)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—14	См. табл. 2.1, п. 1—14	
15	Коэффициент рассеяния потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
16	Диаметр магнита D_M , м	$D_M \geq \sqrt[3]{\frac{(26,6 \div 33,4) k \Phi_b k_z k_{z\delta} (D^2 l) \sigma}{\pi B_d}}$
17	Диаметр D_1 , м	$D_1 \geq D_M$ (по конструктивным соображениям)
18	Диаметр D_2 , м	$D_2 = D_1 + 2\delta'$
19	Диаметр D , м	$D = D_2 + (20 \div 40) \delta$ (по конструктивным соображениям)
20—32	См. табл. 2.1, п. 16—28	
33	Поток в магните Φ_M , Вб	$\Phi_M = \Phi_\delta \sigma$

№ п.п.	Параметр	Формула
34—36	См. табл. 2.1, п. 33—35	—
37	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
38	Сечение магнитопровода S_a , м ²	$S_a = \Phi_\delta / B_a$
39—47	См. табл. 2.1, п. 36—44	—
48	Индукция в конструктивном зазоре B_{δ_k} , Т	$B_{\delta_k} = \Phi_\delta / (\pi D_1 l)$
49	Потери н. с. на один конструктивный зазор F_{δ_k} , А	$F_{\delta_k} = 0,8\delta' B_{\delta_k} 10^6$
50	Полная н. с. системы $\sum F$, А	$\sum F = 4F_z + F_a + 2F_{\delta_p} + 2F_{\delta_k}$
51—52	См. табл. 2.1, п. 46—47	—
53	Размеры муфты, м	$D_3 = D + 2\delta'; D_4 = D_3 + 2a;$ $D_5 = D_4 + 2\delta'; D_6 = D_5 +$ $+ (8 \div 9) \delta + (1 \div 2) 10^{-3}; D_7 =$ $= \sqrt{(\pi D_6^2 / 4 + S_a) 4 / \pi}; L = l_m +$ $+ 2l$

П р и м е ч а н и е. См. примечания к табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.6. Порядок расчета муфты по схеме 3 при заданных величинах a и δ' (см. рис. 2.7)

№ п.п.	Параметры	Формула
1—20	См. табл. 2.2, п. 1—20	—
21	Диаметр D_2 , м	$D_2 = D - (20 \div 40) \delta$ (по конструктивным соображениям)
22	Диаметр D_1 , м	$D_1 = D_2 - 2\delta'$
23	Диаметр D_m , м	$D_m \leq D_1$ (по конструктивным соображениям)
24—43	См. табл. 2.2, п. 22—41	—
44	Индукция в конструктивном зазоре B_{δ_k} , Т	$B_{\delta_k} = \Phi_\delta / (\pi D_1 l)$
45	Потери н. с. на один конструктивный зазор F_{δ_k} , А	$F_{\delta_k} = 0,8\delta' B_{\delta_k} 10^6$
46	Полная н. с. системы $\sum F$, А	$\sum F = 2F_z + F_a + 2F_{\delta_p} + 2F_{\delta_k}$

№ п. п.	Параметр	Формула
47—49 50	См. табл. 2.2, п. 43—44 Размеры муфты, м	$D_2 = D + 2\delta'; D_4 = D_3 + 2a;$ $D_5 = D_4 + 2\delta'; D_6 = D_5 +$ $\frac{1}{(8 \div 9)} \delta + (1 \div 2) 10^{-3}; D_7 =$ $= \sqrt{\pi D_6^2 / 4 + S_a} 4 / \pi; L = l_M +$ $+ 2l$

П р и м е ч а н и е. См. примечания к табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.7. Порядок расчета муфты по схеме 4
(см. рис. 2.8, а)

№ п. п.	Параметр	Формула
1—14	См. табл. 2.1, п. 1—14	—
15	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
16	Диаметр внутренней полумуфты D , м	$D \geq (8 \div 9) \delta + (1 \div 2) 10^{-3} +$ $+ \sqrt[3]{(26,6 \div 33,4) k_F k_{bz} k_z B_{z\delta} (D^2 l) / \pi B_a}$
17—31	См. табл. 2.1, п. 16—30	—
32—33	См. табл. 2.1, п. 32—33	—
34—42	См. табл. 2.1, п. 36—44	—
43	Диаметры, м	$D_2 = D + 2\delta; D_3 = D_2 +$ $+ (20 \div 40) \delta$
44	Индукция в конструктивном зазоре $B_{\delta k}$, Т	$B_{\delta k} = \Phi_\delta / (\pi D_3 l)$
45	Потери н. с. на один конструктивный зазор $F_{\delta k}$, А	$F_{\delta k} = 0,8 \delta' B_{\delta k} 10^6$
46	Полная н. с. системы	$\sum F = 4F_z + F_a + 2F_{\delta p} + 2F_{\delta k}$
47—48	$\sum F$, А	—
49	См. табл. 2.1, п. 46—47 Размеры муфты, м	$D_1 = D - 2h_z - (1 \div 2) 10^{-3};$ $D_4 = D + 2\delta'; D_5 = D_4 + 2a;$ $D_6 = D_3 + 2\delta'; D_7 \geq D_6$ (по конструктивным соображениям); $D_8 = \sqrt{\pi D_7^2 / 4 + S_m} 4 / \pi; L =$ $= 2l + l_M$

П р и м е ч а н и е. См. примечания к табл. 2.1.

Таблица 2.8. Порядок расчета муфты по схеме 4
при заданных величинах a и δ' (см. рис. 2.8, а)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—20	См. табл. 2.2, п. 1—20	—
21	Диаметр D_1 , м	$D_1 = D - (8 \div 9) \delta - (1 \div 2) 10^{-3}$
22	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
23	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = B_a \pi D_1^2 / 4$
24—27	См. табл. 2.2, п. 27—30	—
28	Коэффициент рассеяния магнитного потока, σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
29	Поток в магните Φ_m , Вб	$\Phi_m = \Phi_\delta \sigma$
30	Сечение магнита S_m , м ²	$S_m = \Phi_m / B_d$
31—40	См. табл. 2.2, п. 32—41	—
41	Диаметры, м	$D_2 = D + 2\delta; D_3 = D_2 + (20 \div 40) \delta$
42	Индукция в конструктивном зазоре B_{δ_k} , Т	$B_{\delta_k} = \Phi_\delta / (\pi D_3 l)$
43	Потери и. с. на один конструктивный зазор F_{δ_k} , А	$F_{\delta_k} = 0,8 \delta' B_{\delta_k} 10^6$
44	Полная и. с. системы	$\sum F = 4F_z + F_a + 2F_{\delta_p} + 2F_{\delta_k}$
	$\sum F$, А	
45—46	См. табл. 2.2, п. 43—44	—
47	Размеры муфты, м	$D_1 = D - 2h_2 - (1 \div 2) 10^{-3}; D_4 = D + 2\delta'; D_5 = D_4 + 2a; D_6 = D_3 + 2\delta'; D_7 \geq D_6;$ $D_8 = \sqrt{(\pi D_7^2 / 4 + S_m) 4 / \pi}; L = 2l + l_m$

Примечания: 1. См. примечания к табл. 2.2. 2. При расчете муфты, показанной на рис. 2.8, б, размеры ее (см. табл. 2.7, п. 49 и 2.8, п. 47) определяются формулами: $D_1 = D - 2h_2 - (1 \div 2) 10^{-3}; D_4 = D + 2\delta'; D_5 = D_4 + 2a; D_6 = D_3 + 2\delta'; D_9 = \sqrt{(\pi D_6^2 / 4 + S_a) 4 / \pi}; D_7 = D_9 + 2l_{az}; D_8 = \sqrt{(\pi D_7^2 / 4 + S_m) 4 / \pi}; b_2 = \frac{\Phi_m}{\pi D_9 B_a}; b_1 = \frac{\Phi_m}{\pi D_7 B_a}; L_1 = 2l + l_{az}; L_2 = 2b_1 + l_m$.

Таблица 2.9. Порядок расчета муфты по схеме 5
(см. рис. 2.9)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—9 10	См. табл. 2.1, п. 1—9 Отношение $2b/(\pi D)$	$2b/(\pi D) = \alpha$, где $\alpha = 0,4 \div 0,2$
11	Произведение главных размеров $D^2 l$, м ³	$D^2 l = 3,82 \cdot 10^{-6} \frac{P k_3 k_m k_h}{n B_{z\delta}^2 K a}$
12	Толщина экрана a , м	По конструктивным соображениям
13	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
14	Рабочий зазор δ , м	$\delta = a + 2\delta'$
15	Диаметр внутренней полумуфты D , м	$D \geq 1,66 B_{z\delta} 10^6 / B_d + (16 \div 18) \delta$
16	Проверка толщины a по давлению	По методике (см. п. 3.7)
17	Длина зубца l , м	$l = (D^2 l)/D^2$
18	Зубцовое деление τ , м	$\tau = 6,65 \delta$
19	Ширина полюса b , м	$b = \alpha \pi D / 2$
20	Число зубцов в одном полюсе, z	$z = \frac{\pi D}{2} \frac{\alpha}{\tau}$
21	Отношение a/δ	См. п. 14, 16
22	Глубина проникновения тока в экран Δ , м	$\Delta = \sqrt{\frac{30\alpha}{\pi n z \mu_s \gamma_e}}$
23—27 28	См. табл. 2.1, п. 21—25 Угол между гранями зубца 2α , ...	$2\alpha_z = 20 \div 24$
29	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = z b_z l k_\Phi B_{z\delta}$
30	Коэффициент рассеяния потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
31	Диаметр вала d , м	По методике (см. п. 3.9) или по конструктивным соображениям
32	Ширина магнита A , м	$A = \Phi_\delta \sigma / (B_d l) + d$
33	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
34	Сечение магнитопровода S_a , м ²	$S_a = \Phi_\delta / (2 B_a)$
35	Диаметры, м	$D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a;$ $D_3 = D_2 + 2\delta; D_4 \geq A + 20\delta$ или $D_4 \geq D_3 + 2h_z + (1 \div 2) \cdot 10^{-3}$; $D_5 = \sqrt{(\pi D_4^2 / 4 + S_a) \pi / 4};$

№ п.п.	Параметр	Формула
36—41 42	См. табл. 2.1, п. 36—41 Длина пути магнитного потока в магнитопроводе l_f	По эскизу муфты $l_f = (D_4 + \frac{D_5 - D_4}{2}) \frac{\pi}{2}$
43—47	См. табл. 2.1, п. 43—47	—

П р и м е ч а н и е. При расчете неэкранированной системы п. 12, 13, 16, 21—25 из расчета исключаются.

2.2 РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Расчет одноименно-полюсных механизмов на литых магнитах во многом аналогичен расчету одноименно-полюсных муфт вращения.

Геометрия зубцовых элементов механизма. Геометрия зубцовых элементов определяется соотношениями, приведенными в п. 2.1. Число зубцов $z = l_1/\tau = (0,15 \div 0,12) l_1/\delta = k_2 l_1/\delta$, где l_1 — длина зубцового элемента в направлении перемещения; $k_2 = 0,15 \div 0,12$.

При линейном перемещении угловая частота поля в экране $\omega = 2\pi v/\tau$, где v — линейная скорость, м/с; τ — зубцовый шаг, м. Отсюда

$$\frac{\delta}{\Delta} = \delta / \sqrt{\frac{\tau}{\pi \mu_r \gamma_e}}.$$

В механизмах с поступательным движением частей зубцы располагаются перпендикулярно направлению перемещения.

В винтовых механизмах одна часть вращается, другая — движется поступательно. Зубцы на частях механизма нарезаются по винтовой линии. Угол подъема винтовой линии $\lambda = \arctg \frac{\tau}{\pi D}$. При многозаходных винтах вместо τ следует писать $n_3 \tau$, где n_3 — число заходов. Скорость v (м/с) винтовых механизмов определяется зависимостью

$$v = n \tau / 60 = (\pi D n \operatorname{tg} \lambda) / 60,$$

где n — частота вращения винта, об/мин,

$$\frac{\delta}{\Delta} = \delta / \sqrt{\frac{60}{\pi \mu_r \gamma_e}}.$$

Значения функции N определяются так же, как в п. 2.1.

Определение главных размеров. Главными размерами механизма являются размеры зубцовых элементов — длина зубцов l и длина зубцового элемента l_1 в направлении перемещения.

Сила (H), передаваемая единицей площади зубцового элемента,

$$f = KB_{z\delta}^2/\mu_0.$$

При площади зубцового элемента плоских механизмов $S_3 = ll_1$ (табл. 1.1, схемы 18—20) передаваемая сила составляет

$$F_{\text{эм}} = S_3 KB_{z\delta}^2/\mu_0.$$

Отсюда следует, что $ll_1 = 12,56 \cdot 10^{-7} \frac{Fk_3 k_n}{B_{z\delta}^2 Km}$. Для цилиндрических механизмов (табл. 1.1, схемы 21, 22, 24) $l = \pi D$, где D — диаметр внутренней части механизма.

Произведение главных размеров (м^2)

$$Dl_1 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{Fk_3 k_n}{B_{z\delta}^2 Km}.$$

По условиям прохождения магнитного потока при магните во внутренней части механизма

$$D_m \geq \sqrt{\frac{4k_{bz}k_\Phi B_{z\delta}(Dl_1)}{B_d}},$$

при магните в наружной части диаметр тела внутренней части механизма

$$D_1 \geq \sqrt{\frac{4k_{bz}k_\Phi B_{z\delta}(Dl_1)}{B_a}}.$$

При заданном отношении δ/Δ величина зазора механизма с поступательным движением ведущей и ведомой частей

$$\delta = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{1}{(\delta/\tau) \pi v \mu_s \gamma_s};$$

для винтового механизма

$$\delta = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{60}{\pi v \mu_s \gamma_s}.$$

Для винтового механизма по схеме 23 в табл. 1.1

$$l = 0,5\pi D - l_{az},$$

где D — диаметр винта; l_{az} — расстояние между частями разрезной гайки с различной полярностью.

Для прецизионной передачи

$$\frac{F_{\text{эм}}}{F} = k_3 = \frac{1}{\sin(0,5z\gamma/k_{bz})}.$$

Отсюда подбирают число зубцов и коэффициент запаса по передаваемой силе.

Расчет магнитной цепи и определение размеров магнита. Расчет выполняется аналогично приведенному в п. 2.1. Магнитный поток определяется по формулам:

для плоского и червячного механизмов

$$\Phi_{\delta} = k_{bz}k_{\Phi}ll_1B_{z\delta},$$

для цилиндрического механизма

$$\Phi_{\delta} = \pi k_{bz}k_{\Phi}Dl_1B_{z\delta}.$$

Потери в экране и к. п. д. Тормозная сила экрана

$$F_{\text{з}} = ll_1B_{z\delta}^2Nm/\mu_{\text{з}}.$$

Коэффициент полезного действия механизма по экрану

$$\eta_{\text{з}} = \frac{F - F_{\text{з}}}{F} = \frac{Q/k_3 - N/2}{Q/k_3 + N/2}.$$

Ниже приведен порядок расчета механизмов поступательного перемещения по наиболее распространенным расчетным схемам 6—10 (рис. 2.10—2.14, табл. 2.10—2.18) при следующих заданных параметрах: передаваемая сила F , Н; линейная скорость v , м/с; частота вращения n , об/мин (для винтовых механизмов); коэффициент запаса k_3 ($k_3 \geq 1,65$); перепад давлений Δp , Па; материал экрана; удельная электропроводность $\gamma_{\text{з}}$, См/м; предел текучести σ_t , МПа; магнитная проницаемость $\mu_{\text{з}}$, Г/м; материал магнита; расчетная индукция B_d , Т (по характеристике магнита); напряженность поля H_d , А/м (по характеристике магнита); рабочая температура t , °С.

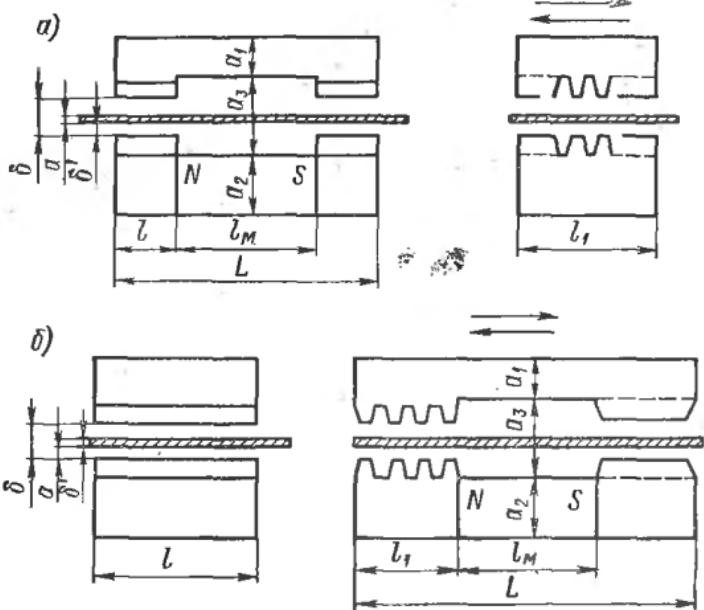


Рис. 2.10. Синхронный одноименно-полюсный плоский механизм поступательного перемещения с прямоугольным магнитом: а — с поперечным расположением магнита; б — с продольным (расчетная схема б)

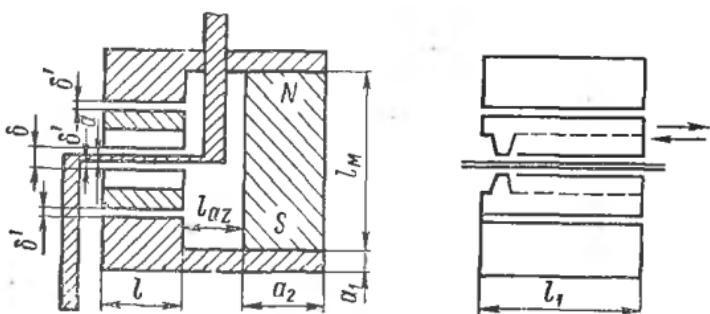


Рис. 2.11. Синхронный одноименно-полюсный плоский механизм поступательного перемещения с неподвижным магнитом (расчетная схема 7)

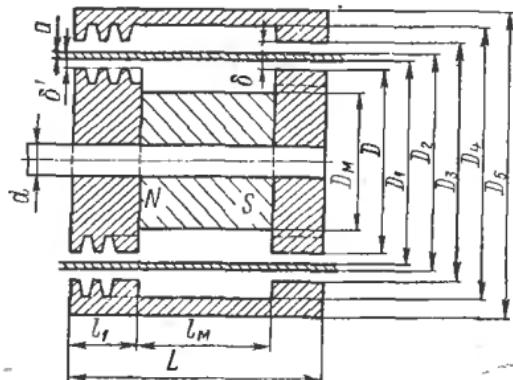


Рис. 2.12. Синхронный одноименно-полюсный цилиндрический механизм поступательного перемещения с магнитом во внутренней части механизма, зубцы кольцевые или по винтовой линии (расчетная схема 8)

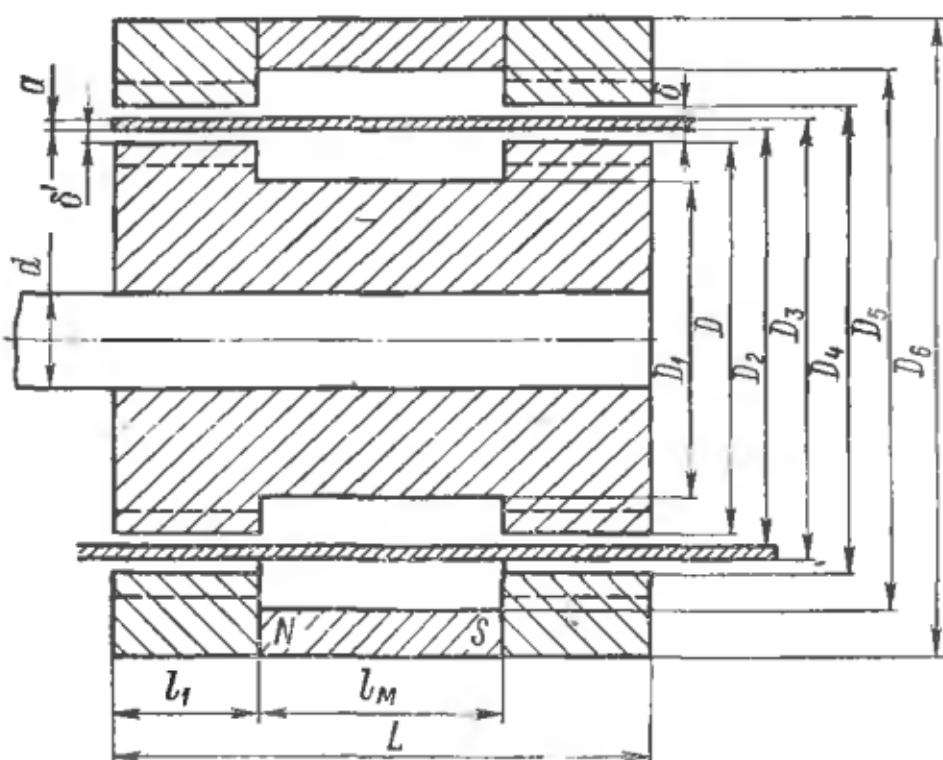


Рис. 2.13. Синхронный одноименно-полюсный цилиндрический механизм поступательного перемещения с магнитом в наружной части механизма, зубцы кольцевые или по винтовой линии (расчетная схема 9)

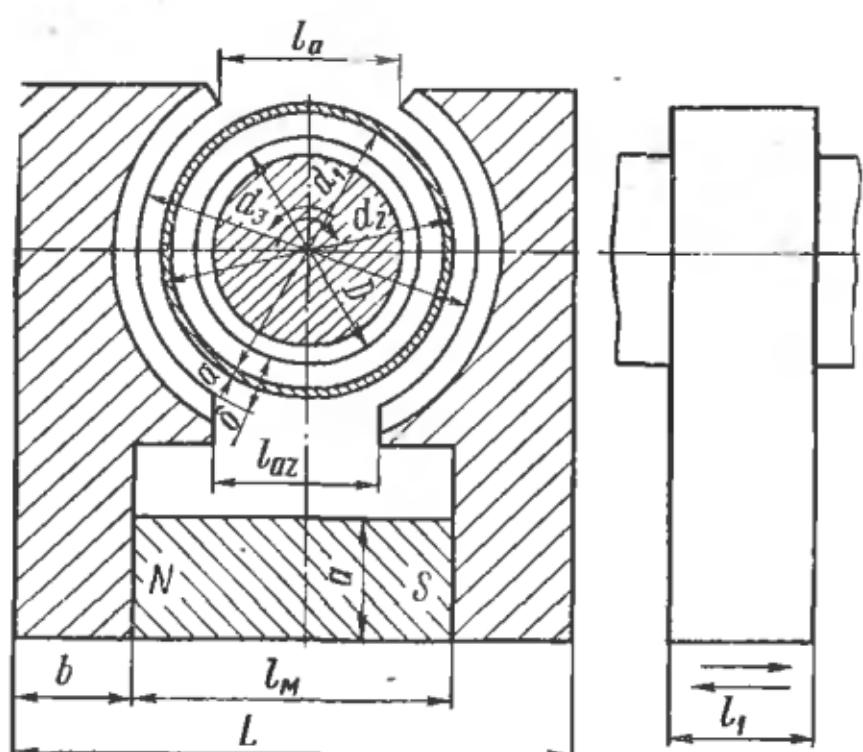


Рис. 2.14. Синхронный одноименно-полюсный механизм винт—гайка с поперечным замыканием магнитного потока (расчетная схема 10)

Т а б л и ц а 2.10. Порядок расчета механизма по схеме 6
(см. рис. 2.10)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—6	См. табл. 2.1, п. 1—6	—
7	Коэффициент числа зубцов * k_z	$k_z = 0,15 \div 0,12$
8—10	См. табл. 2.1, п. 8—10	—
11	Произведение главных размеров U_1 , м ²	$U_1 = 12,56 \cdot 10^{-7} \frac{Fk_3k_n}{B_{z\delta}^2 K m}$
12	Величина рабочего зазора δ , м	$\delta = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{1}{(\delta/\tau) \pi \mu_s \gamma_e}$
13	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
14	Толщина экрана a , м	$a = \delta - 2\delta'$
15	Зубцовое деление * τ , м	$\tau = \delta/k_z$
16	Ширина гребня зубца b_z , м	$b_z = k_{b_z} \tau$
17	Высота зубца h_z , м	$h_z = (4 \div 4,5) \delta$
18	Угол между гранями зубца $2\alpha_z$, ...	$2\alpha_z = 20 \div 24$
19	Длина зубцового элемента l_1 , м	По конструктивным соображениям
20	Число зубцов z	$z = l_1/\tau$
21	Длина зубцов l , м	$l = (U_1)/l_1$
22	Отношение a/δ	См. п. 12 и 14
23	Глубина проникновения тока в экран Δ , м	$\Delta = \sqrt{\frac{\tau}{\pi \mu_s \gamma_e}}$
24—26	См. табл. 2.1, п. 21—23	—
27	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = k_{b_z} k_\Phi U_1 B_{z\delta}$
28—32	См. табл. 2.1, п. 29—33	—
33—43	См. табл. 2.1, п. 36—46	—
44	К. п. д. механизма $\eta_{экр}$	$\eta_{экр} = \frac{Q/k_3 - N/2}{Q/k_3 + N/2}$

№ п.п.	Параметр	Формула
45	Размеры механизма, м: для схемы, показанной на рис. 2.10, а для схемы, показанной на рис. 2.10, б	$a_1 = S_a/l_1; \quad a_2 = S_m/l_1; \quad a_3 \geq 10\delta; \quad L = 2l + l_m$ $a_1 = S_a/l; \quad a_2 = S_m/l; \quad a_3 \geq 10\delta; \quad L = 2l_1 + l_m$

П р и м е ч а н и я: 1. При расчете экранированного механизма принятое значение δ/Δ проверяется по расчету толщины экрана, затем корректируется принятое значение N . После определения окончательных размеров механизма следует проверить работоспособность экрана. Деформация экрана должна быть менее δ' . 2. При расчете неэкранированного механизма $N = 0$, величина δ принимается по конструктивным соображениям, п. 1, 3, 13, 14, 22–27 из расчета исключаются. 3. Величина l_a определяется последовательным приближением по l_m .

* Первое граничное значение относится к экранированному механизму с $\delta/\Delta < 0,1$ (до 0,05); второе — к неэкранированному или экранированному с $\delta/\Delta \ll 0,1$.

Т а б л и ц а 2.11. Порядок расчета механизма по схеме 6 при заданных a и δ' (см. рис. 2.10)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Толщина экрана a , м	По конструктивным соображениям
2	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
3	Величина рабочего зазора δ , м	$\delta = a + 2\delta'$
4	Коэффициент числа зубцов * k_z	$k_z = 0,15 \div 0,12$
5	Коэффициент гребня зубца k_{bz}	$k_{bz} = 0,35 \div 0,45$
6	Коэффициент потока через паз k_Φ	$k_\Phi = 1,1 \div 1,3$
7	Зубцовое деление * τ , м	$\tau = \delta/k_z$
8	Ширина гребня зубца b_z , м	$b_z = k_{bz}\tau$
9	Высота зубца h_z , м	$h_z = (4 \div 4,5) \delta$
10	Угол между гранями зубца $2\alpha_z$, ...	$2\alpha_z = 20 \div 24$

№ п.п.	Параметр	Формула
11	Индукция над зубцом $B_{z\delta}$, Т	$B_{z\delta} = 0,8 \div 1,5$
12	Коэффициент насыщения зубцов k_h	См. п. 2.1
13	Число рабочих зазоров m	В соответствии с принятой схемой механизма
14—15	См. табл. 2.2, п. 9—10	
16	Отношение δ/Δ	$\delta/\Delta = \delta / \sqrt{\frac{\tau}{\pi v \mu_3 \gamma_3}}$
17—19	См. табл. 2.2, п. 11—13	
20	Произведение главных размеров U_1 , м ²	$U_1 = 12,56 \cdot 10^{-7} \frac{F k_3 k_h}{B_{z\delta}^2 K m}$
21	Длина зубцового элемента l_1 , м	По конструктивным соображениям
22	Число зубцов z	$z = l_1 / \tau$
23	Длина зубцов l , м	$l = (l_1 l) / l_1$
24	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = k_{bz} k_\Phi U_1 B_{z\delta}$
25—29	См. табл. 2.1, п. 29—33	—
30—40	См. табл. 2.1, п. 36—46	—
41—42	См. табл. 2.10, п. 44—45	—

П р и м е ч а н и я: 1. Окончательный проверочный расчет экрана производится после определения всех размеров механизма. 2. Величина l_a последовательными приближениями корректируется по l_m .

* Первое граничное значение относится к экранированному механизму с $\delta/\Delta \leq 0,1$ (до 0,05); второе — к неэкранированному или экранированному с $\delta/\Delta \ll 0,1$.

Т а б л и ц а 2.12. Порядок расчета механизма по схеме 7
(см. рис. 2.11)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—32	См. табл. 2.10, п. 1—32	—
33—41	См. табл. 2.1, п. 36—44	—
42	Индукция в конструктивном зазоре $B_{\delta K}$, Т	$B_{\delta K} = \Phi_\delta / l_1 l$
43	Потери н. с. на один конструктивный зазор, $F_{\delta K}$, А	$F_{\delta K} = 0,88' B_{\delta K} 10^6$

№ п.п.	Параметр	Формула
44	Полная н. с. системы, $\sum F$, А	$\sum F = 2F_z + F_a + F_{\delta p} + 2F_{\delta k}$
45	Длина магнита l_m , м	$l_m = \sum F / H_d$
46	К. п. д. механизма $\eta_{экр}$	$\eta_{экр} = \frac{Q/k_3 - 0,5N}{Q/k_3 + 0,5N}$
47	Размеры механизма, м	$l_{a2} \geq (7 \div 15) \delta; \quad a_1 = S_a / l_1;$ $a_2 = S_m / l_1$

П р и м е ч а н и е. См. примечания к табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.13. Порядок расчета механизма по схеме 7
при заданных a и δ' (см. рис. 2.11)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—29	См. табл. 2.12, п. 1—29	—
30—38	См. табл. 2.1, п. 36—44	—
39—44	См. табл. 2.12, п. 42—47	—

П р и м е ч а н и е. См. примечания к табл. 2.11.

Т а б л и ц а 2.14. Порядок расчета механизма по схеме 8
(см. рис. 2.12)

№ п. п.	Параметр	Формула
1—10	См. табл. 2.1, п. 1—10	—
11	Произведение главных размеров Dl_1 , м ²	$Dl_1 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{Fk_3k_H}{B_{z\delta}^2 K m}$
12	Величина рабочего зазора δ , м: для механизма с поступательным движением частей для винтового механизма	$\delta = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{1}{(\delta/\tau) \pi \mu_e \gamma_e}$ $\delta = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{60}{\pi \mu_e \gamma_e}$

№ п.п.	Параметр	Формула
13	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
14	Толщина экрана a , м	$a = \delta' - 2\delta'$
15	Диаметр D , м	$D \geq (8 \div 9) \delta +$ $+ \sqrt{\frac{4k_{b2}k_{\Phi}B_{z\delta}(Dl_1)}{B_d}}$
16	Длина зубцового элемента l_1 , м	$l_1 = (Dl_1)/D$
17	Зубцовое деление * τ , м	$\tau = (6,65 \div 8,35) \delta$
18	Число зубцов z	$z = l_1/\tau$
19	Длина зубца l , м	$l = \pi D$
20	Для винтовых механизмов — угол подъема винтовой линии λ	$\lambda = \arctg \frac{60v}{\pi Dn}$
21	Отношение a/δ	См. п. 12 и 14
22	Глубина проникновения тока в экран Δ , м:	<p>для механизма с поступательным движением частей</p> $\Delta = \sqrt{\frac{\tau}{\pi \mu \rho \gamma_e}}$ <p>для винтового механизма</p> $\Delta = \sqrt{\frac{60}{\pi \mu \rho \gamma_e}}$
23—29	См. табл. 2.1, п. 21—27	$\Phi_{\delta} = \pi k_{b2} k_{\Phi} D l_1 B_{z\delta}$
30	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_{δ} , Вб	—
31—48	См. табл. 2.1, п. 29—46	—
49	К. п. д. механизма $\eta_{\text{экр}}$	$\eta_{\text{экр}} = \frac{Q/k_3 - 0,5N}{Q/k_3 + 0,5N}$
50	Проверка величины диаметра D , м	$D \geq D_m + 2h_z$
51	Размеры механизма, м	$D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a;$ $D_3 = D_2 + 2\delta'; D_4 = D_3 + 2h_z +$ $+ (1 \div 3) 10^{-3}; D_5 =$ $= \sqrt{(S_a + \pi D_4^2/4) 4/\pi}; L =$ $= 2l_1 + l_m$

П р и м е ч а н и е. См. примечания к табл. 2.1.

* Первое граничное значение относится к экранированному механизму с $\delta/\Delta \leq 0,1$ (до 0,05); второе — к неэкранированному и экранированному с $\delta/\Delta \ll 0,1$.

Таблица 2.15. Порядок расчета механизма по схеме 8
при заданных a и δ' (см. рис. 2.12)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—3	См. табл. 2.2, п. 1—3	—
4	Коэффициент потока через паз k_{Φ}	$k_{\Phi} = 1,1 \div 1,3$
5	Коэффициент гребня зубца k_{bz}	$k_{bz} = 0,35 \div 0,45$
6	Зубцовое деление * τ , м	$\tau = (6,65 \div 8,35) \delta$
7	Ширина гребня зубца b_z , м	$b_z = \tau k_{bz}$
8	Высота зубца h_z , м	$h_z = (4 \div 4,5) \delta$
9	Угол между гранями зубца $2\alpha_z$, ...°	$2\alpha_z = 20 \div 24$
10	Отношение δ/Δ :	
	для механизма с поступательным движением частей	$\delta/\Delta = \delta / \sqrt{\frac{\tau}{\pi \mu_e \gamma_e}}$
	для винтового механизма	$\delta/\Delta = \delta / \sqrt{\frac{60}{\pi \mu_e \gamma_e}}$
11—15	См. табл. 2.2, п. 9—13	—
16	Индукция над зубцом $B_{z\delta}$, Т	$B_{z\delta} = 0,8 \div 1,5$
17	Коэффициент насыщения k_i	См. п. 2.1
18	Число рабочих зазоров m	В соответствии с принятой схемой механизма
19	Произведение главных размеров Dl_1 , м ²	$Dl_1 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{Fk_s k_h}{B_{z\delta}^2 K m}$
20	Диаметр D , м	$D \geq (8 \div 9) \delta + \sqrt{\frac{4k_{bz} k_{\Phi} B_{z\delta} (Dl_1)}{B_d}}$
21	Проверка толщины экрана a по давлению	По методике (см. п. 3.7)
22	Длина зубцового элемента l_1 , м	$l_1 = (Dl_1)/D$

№ п. п.	Параметр	Формула
23	Длина зубца l , м	$l = \pi D$
24	Число зубцов z	$z = l/\tau$
25	Для винтовых механизмов угол подъема винтовой линии λ	$\lambda = \operatorname{arctg} \frac{60v}{\pi Dn}$
26—47	См. табл. 2.13, п. 30—51	—

П р и м е ч а и е. См. примечания к табл. 2.11.

* Первое граничное значение относится к экранированному механизму с $\delta/\Delta \leq 0,1$ (до 0,05); второе — к неэкранированному или к экранированному с $\delta/\Delta \leq 0,1$.

Т а б л и ц а 2.16. Порядок расчета механизма по схеме 9
(см. рис. 2.13)

№ п. п.	Параметр	Формула
1—14	См. табл. 2.14, п. 1—14	—
15	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
16	Диаметр D , м	$D \geq (8 \div 9) \delta +$ $+ \sqrt{\frac{4k_{b_z} k_{\Phi} B_{z\delta} (Dl_1)}{B_a}}$
17—31	См. табл. 2.14, п. 16—30	—
32—33	См. табл. 2.1, п. 29—30	—
34—35	См. табл. 2.1, п. 32—33	—
36—46	См. табл. 2.1, п. 36—46	—
47	К. п. д. механизма $\eta_{\text{экр}}$	$\eta_{\text{экр}} = \frac{Q/k_3 - 0,5N}{Q/k_3 + 0,5N}$
48	Размеры механизма, м	$D_1 = D - 2h_z - (1 \div 2) 10^{-3};$ $D_2 = D + 2\delta'; \quad D_3 = D_2 + 2a;$ $D_4 = D_3 + 2\delta'; \quad D_5 = D_4 + 2h_z;$ $D_6 = \sqrt{(\pi D_5^2/4 + S_M) 4/\pi}; \quad L =$ $= l_M + 2l_1$

П р и м е ч а и е. См. примечания к табл. 2.1.

Таблица 2.17. Порядок расчета механизма по схеме 9
при заданных a и δ' (см. рис. 2.13)

№ п. п.	Параметр	Формула
1—19 20 21	См. табл. 2.15, п. 1—19 Индукция в стали B_a , Т Диаметр D , м	$B_a = 1,2 \div 1,5$ $D \geq (8 \div 9) \delta +$ $+ \sqrt{\frac{4k_{bz} k_\Phi B_{z\delta} (Dl_1)}{B_a}}$
22—24 25	См. табл. 2.15, п. 21—23 Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = \pi k_{bz} k_\Phi Dl_1 B_{z\delta}$
26—42	См. табл. 2.16, п. 32—48	—

Примечание. См. примечание к табл. 2.11

Таблица 2.18. Порядок расчета механизма по схеме 10
(см. рис. 2.14)

№ п. п.	Параметр	Формула
1—9	См. табл. 2.1, п. 1—9	—
10	Величина рабочего зазора δ , м	$\delta = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{60}{\pi \mu \rho \gamma_3}$
11	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
12	Толщина экрана a , м	$a = \delta - 2\delta'$
13	Расстояние между зубцовыми элементами l_{az} , м	$l_{az} \geq (7 \div 15) \delta$
14	Произведение главных размеров, м ²	$(\pi D/2 - l_{az}) l_1 = 6,28 \cdot 10^{-7} \times$ $\times \frac{F k_3 k_H}{B_{z\delta}^2 K}$
15	Диаметр винта D , м	По конструктивным соображениям
16	Длина винта l_1 , м	$l_1 = \frac{[(\pi D/2 - l_{az}) l_1]}{\pi D/2 - l_{az}}$
17	Проверка толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
18	Отношение a/δ	См. п. 10 и 17

№ п.п.	Параметр	Формула
19	Функция N' при $a/\delta = 1$	По рис. 2.4
20	Значение N	$N = N' a/\delta$
21	Зубцовое деление τ , м	$\tau = (6,65 \div 8,35) \delta$
22	Ширина гребня зубца b_z , м	$b_z = k_{bz} \tau$
23	Высота зубца h_z , м	$h_z = (4 \div 4,5) \delta$
24	Длина зубца l , м	$l = \pi D/2 - l_{az}$
25	Угол между гранями зубца $2\alpha_z$, ...	$2\alpha_z = 20 \div 24$
26	Угол подъема винтовой линии λ	$\lambda = \arctg \frac{60v}{\pi Dn}$
27	Магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ , Вб	$\Phi_\delta = k_{bz} k_\Phi l_1 (0,5\pi D - l_{az}) B_{z\delta}$
28—32	См. табл. 2.1, п. 29—33	—
33—43	См. табл. 2.1, п. 36—46	—
44	К. п. д. механизма $\eta_{экр}$	$\eta_{экр} = \frac{Q/k_3 - 0,5N}{Q/k_3 + 0,5N}$
45	Размеры механизма, м	$d_1 = D + 2\delta'; \quad d_2 = d_1 + 2a;$ $d_3 = d_2 + 2\delta'; \quad b = S_a/l_1; \quad a =$ $= S_m/l_1$

2.3 РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ РЕДУКТОРОВ

Наибольшее распространение получили системы с внутренним зацеплением, например схема планетарного редуктора 2К-Н с двумя внутренними зацеплениями, приведенная в табл. 1.1, схема 26.

Схема одной ступени синхронного магнитного редуктора (СМР) с внутренним зацеплением показана на рис. 2.15. Магнитный поток проходит в зазоре между шестернями радиально, т. е. редуктор одноименно-полюсный. Намагничивающую силу, приходящуюся на одну ступень, по условиям разработки магнитной системы следует брать в диапазоне $F_{\delta p} = 1500 \div 5000$ А.

Момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$), передаваемый одной ступенью с внутренним зацеплением,

$$M_{эм} = 17,42 \cdot 10^{-7} z_1^2 l F_{\delta p}^2 N_m,$$

где z_1 — число зубцов меньшего колеса; N_m — функция, учитывающая изменение момента, передаваемого зубцами, за счет изменения зазора между ними; l — длина зубцов в осевом направлении, м. Отсюда следует, что целесообразно увеличивать числа зубцов при постоянстве

передаточного отношения. Значения функции N_M показаны на рис. 2.16 и приведены в табл. 2.19. Функция N_M может быть рассчитана по формуле

$$N_M = e^{-\frac{\xi}{2\tau} \delta_{\max}} I_0(\xi \delta_{\max}/2\tau),$$

где $\xi = 12,5$; $I_0(\xi \delta_{\max}/2\tau)$ — функция Бесселя нулевого порядка. Задав значение z_1 и определив по передаточному отношению z_2 , можно

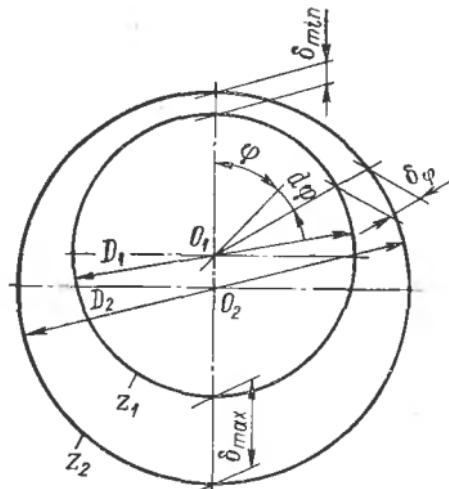


Рис. 2.15. Схема одной ступени СМР с внутренним зацеплением (δ_{\min} , δ_{\max} — минимальный и максимальный зазоры; D_1 и z_1 — диаметр и число зубцов внутренней шестерни; D_2 и z_2 — диаметр и число зубцов наружной шестерни)

соображений. Обычно $\delta_{\min} \geq 0,1$ мм. Геометрия зубцов — трапецидальная, с углом $2\alpha_z = 20^\circ \div 24^\circ$; $b_z = k_{bz}\tau$, где $k_{bz} = 0,35 \div 0,45$; $h_z = (0,65 \div 0,75) \tau$.

Расстояние между зубцовыми элементами различной полярности $l_{az} = (1,5 \div 2,0) \delta_{\max}$.

Диаметры шестерен: $D_1 = z_1\tau/\pi$; $D_2 = z_2\tau/\pi$.

Магнитный поток через шестерни

$$\Phi_\delta = 2\mu_0 b_z l k_\Phi F_{\delta p} z_1 (\tau \Delta z)^{-1} \sqrt{\frac{\pi}{1 - \left(\frac{2\pi\delta_{\min}}{\tau \Delta z} - 1 \right)^2}}.$$

Сечение стали $S_a = \Phi/B_a$.

Расчет магнита и магнитной цепи редуктора производится теми же методами, что и расчет магнита и магнитной цепи муфт. Особенность, связанную с переменным зазором, имеет расчет потерь н. с. в зубцах.

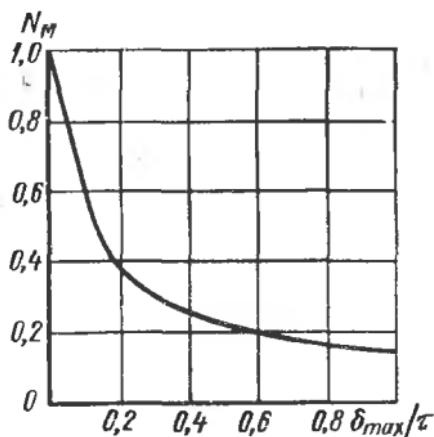


Рис. 2.16. График функции $N_M = f(\delta_{\max}/\tau)$

определить отношение δ_{\max}/τ и соответствующее значение функции N_M .

Величины τ и δ_{\min} могут быть заданы из конструктивных

Геометрия зубцов — трапецидальная, с углом $2\alpha_z = 20^\circ \div 24^\circ$; $b_z = k_{bz}\tau$, где $k_{bz} = 0,35 \div 0,45$; $h_z = (0,65 \div 0,75) \tau$.

В зоне минимального зазора δ_{\min} индукция (Т)

$$B_{z\delta_{\min}} = F_{\delta} \mu_0 / \delta_{\min}.$$

$$\text{Среднее сечение зубца (м)} \quad b_{z \text{ cp}} = b_z + \frac{2}{3} h_z \operatorname{tg} \alpha_z.$$

Потеря н. с. (А) в зубце

$$F_z = h_z a_h \operatorname{sh} (b_h B_{z\delta_{\min}} b_z / b_{z \text{ cp}}),$$

где a_h , b_h — коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания стали зубца. Значения a_h и b_h для некоторых видов сталей приведены в табл. 2.20.

Таблица 2.19.

Значения функции

$$N_m = f(\delta_{\max}/\tau)$$

Δz	δ_{\max}/τ	N_m
1	0,318	0,315
2	0,636	0,196
3	0,955	0,179
4	1,273	0,148
5	1,592	0,127

Таблица 2.20.

Значения коэффициентов a_h и b_h

Марка стали	a_h	b_h
Э11 (1211)	41,7	3,19
Э22 (1312)	41,7	3,19
Э41 (1511)	0,71	5,74
Э44	0,343	6,9
Э31 (1411)	2,06	5,35
10	38,4	3,41

При расчете систем, имеющих несколько ступеней, производится раздельный расчет каждой, а затем рассчитывается общая для ступеней магнитная цепь (если она есть).

Передаточное отношение планетарного редуктора типа 2К-Н с двумя внутренними зацеплениями определяется в соответствии с обычной формулой механического редуктора

$$i = \frac{1}{1 - \frac{z_b z_g}{z_k z_a}},$$

где z_b и z_a — числа зубцов неподвижного и подвижного главных колес; z_k , z_g — числа зубцов венцов сателлита, сцепленных с главными колесами.

Из условий равного эксцентризитета колес в ступенях (при одинаковых δ_{\min}) должно быть соблюдено условие, что $\tau_{bk} (z_b - z_k) = \tau_{ag} (z_a - z_g)$, где τ_{bk} — зубцовый шаг колес b и k ; τ_{ag} — зубцовый шаг колес a и g .

При необходимости редуктор может быть выполнен герметичным, с разделяющим экраном. В этом случае в экранируемой ступени δ_{\min} определяется с учетом толщины экрана. Порядок расчета планетарного редуктора по расчетной схеме 11 (рис. 2.17) приведен в табл. 2.21 при следующих заданных параметрах: момент на выходе M , Н·м; частота вращения на входе n_1 и на выходе n_2 , об/мин; материал магнита; расчетная индукция B_d , Т (по характеристике магнита); напряженность

Таблица 2.21. Порядок расчета магнитного планетарного редуктора 2К-Н по расчетной схеме 11 (см. рис. 2.17)

№ п.п.	Параметр	Формула
		$l_m = l_{az}$
1	Передаточное отношение	$i = n_1/n_2$
2	Соотношение	$\frac{z_b z_g}{z_k z_a} = \frac{i - 1}{i}$
3	Числа зубцов шестерен Разность чисел зубцов в ступени	z_b, z_k, z_a, z_g $\Delta z_1 = z_b - z_k; \Delta z_2 = z_a - z_g$
	Расчет 1-й ступени	
4	Отношение δ_{\max}/τ	$\delta_{\max}/\tau = \Delta z/\pi$
5	Значение $N_m = f(\delta_{\max}/\tau)$	По табл. 2.19
6	Минимальный зазор $\delta_{\min}, \text{м}$	По конструктивным соображениям
7	Намагничивающая сила, приходящаяся на рабочий зазор $F_{\delta p}$, А	$2F_{\delta p} = 1500 \div 5000$
8	Длина зубцов l , м	$l = \frac{M_{\vartheta M} k_3}{17,42 \cdot 10^{-7} F_{\delta p}^2 N_m z^2},$
9	Зубцовый шаг τ , м	где для 1-й ступени $z = z_k$; для 2-й ступени $z = z_g$
10	Диаметры шестерен D_b, D_k (для 2-й ступени D_a и D_g), м	По конструктивным соображениям $D_b = z_b \tau / \pi; D_k = z_k \tau / \pi$
11	Гребень зубца b_z , м	$b_z = (0,35 \div 0,45) \tau$
12	Высота зубца h_z , м	$h_z = (0,65 \div 0,75) \tau$
13	Эксцентриситет e_z , м	$e_z = \Delta z \tau / (2\pi) - \delta_{\min}$
14	Индукция в зоне δ_{\min} $B_{z\delta_{\min}}$, Т	$B_{z\delta_{\min}} = 12,56 \cdot 10^{-7} F_{\delta p} / \delta_{\min}$
15	Среднее сечение зубца $b_{z\text{ср}}$, м (угол наклона граней зубца $\alpha_z = 10 \div 12^\circ$)	$b_{z\text{ср}} = b_z + \frac{2}{3} h_z \operatorname{tg} \alpha_z$
16	Потери н. с. в металле зубца F_z , А	$F_z = h_z a_{\text{ш}} \operatorname{sh} \left(b_{\text{ш}} \frac{b_z}{b_{z\text{ср}}} B_{z\delta_{\min}} \right)$
17	Магнитный поток в зазоре ступени Φ_{δ} , Вб (для 1-й ступени $z = z_k$; для 2-й ступени $z = z_g$)	$\Phi_{\delta} = 25,12 \cdot 10^{-7} b_z l k_{\Phi} F_{\delta p} \times$ $\times \sqrt{\frac{z (\tau \Delta z)^{-1} \pi}{1 - \left(\frac{2\pi \delta_{\min}}{\tau \Delta z} - 1 \right)^2}}$

№ п.п.	Параметр	Формула
Расчет 2-й ступени		
18—22	См. п. 4—8	
23	Зубцовый шаг τ , м	$\tau = \frac{(e_{z_1} + \delta_{\min_2}) 2\pi}{(\Delta z_2)}$
24—31	См. п. 10—17	
Расчет магнитной цепи		
32	Корректировка длины зубца	при $\Phi_{\delta_1} > \Phi_{\delta_2}$ $l_2 = \frac{\Phi_{\delta_1}}{25,12 \cdot 10^{-7} b_{z2} k_F \delta p^2 g (\tau_2 \Delta z_2)^{-1}} \times$ $\times \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{2\pi\delta_{\min_2}}{\tau_2 \Delta z_2} - 1 \right)^2}}{\pi};$ при $\Phi_{\delta_2} > \Phi_{\delta_1}$ $l_1 = \frac{\Phi_{\delta_2}}{25,12 \cdot 10^{-7} b_{z1} k_F \delta p^2 g (\tau_1 \Delta z_1)^{-1}} \times$ $\times \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{2\pi\delta_{\min_1}}{\tau_1 \Delta z_1} - 1 \right)^2}}{\pi}$
33	Индукция в стали магнитопровода B_a , Т	$B_a = 1,0 \div 1,6$
34	Сечение стали магнитопровода S_a , м ²	$S_a = \Phi_\delta / B_a$
35	Диаметр d , м	По расчету или конструктивным соображениям
36	Диаметр D_3 , м	$D_3 = \sqrt{(S_a + \pi d^2/4) 4/\pi}$
37	Длина средней силовой линии в магнитопроводе l_a , м	По эскизу
38	Удельные потери в стали магнитопровода H_a , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
39	Потери н. с. в магнитопроводе F_a , А	$F_a = H_a l_a$
40	Диаметр D_4 , м	По конструктивным соображениям
41	Индукция в конструктивном зазоре B_{δ_k} , Т	$B_{\delta_k} = \frac{\Phi_\delta}{\pi D_4 l_2}$
42	Конструктивный зазор δ_k , м	По конструктивным соображениям

№ п.п.	Параметр	Формула
43	Потери н. с. в конструктивном зазоре $F_{\delta K}$, А	$F_{\delta K} = 0,8\delta_K B_{\delta K} 10^6$
44	Полная н. с. системы $\sum F$, А	$\sum F = 2F_{\delta p} + F_{\delta K} + 2F_{z_1} +$ $+ 2F_{z_2} + F_a$
45	Длина магнита l_M , м	$l_M = \sum F / H_d$
46	Коэффициент рассеяния потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,25$
47	Магнитный поток в магните Φ_M , Вб	$\Phi_M = \Phi_{\delta} \sigma$
48	Сечение магнита S_M , м ²	$S_M = \Phi_M / B_d$
49	Размеры системы, м	$D_5 = D_4 + 2\delta_K \leq D_6; \quad D_6 \geq$ $\geq D_b + 2h_{z1}; \quad D_7 =$ $= \sqrt{(S_M + \pi D_6^2 / 4) 4/\pi}; \quad L = l_1 +$ $+ l_2 + l_M$
50	Расстояние между зубцовыми элементами разноименной полярности l_{az} , м	$2\delta_{max} \leq l_{az} \leq l_M$
		$l_M > l_{az}$
	Размеры системы, м	$D_5 = D + 2\delta_K; \quad D_1 =$ $= \sqrt{(\pi D_5^2 / 4 + S_a) 4/\pi}; \quad D_6 =$ $= D_1 + 2l_{az}; \quad D_7 =$ $= \sqrt{(\pi D_6^2 / 4 + S_M) 4/\pi}; \quad b_2 =$ $= \frac{\Phi_M}{\pi D_1 B_a}; \quad b_1 = \frac{\Phi_M}{\pi D_6 B_a}; \quad L =$ $= l_M + 2b_1; \quad L_c = l_1 + l_2 + l_{az}$

поля H_d , А/м (по характеристике магнита); рабочая температура t , °С; коэффициент запаса k_3 ; материал магнитопровода; коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания материала магнитопровода a_H , b_H .

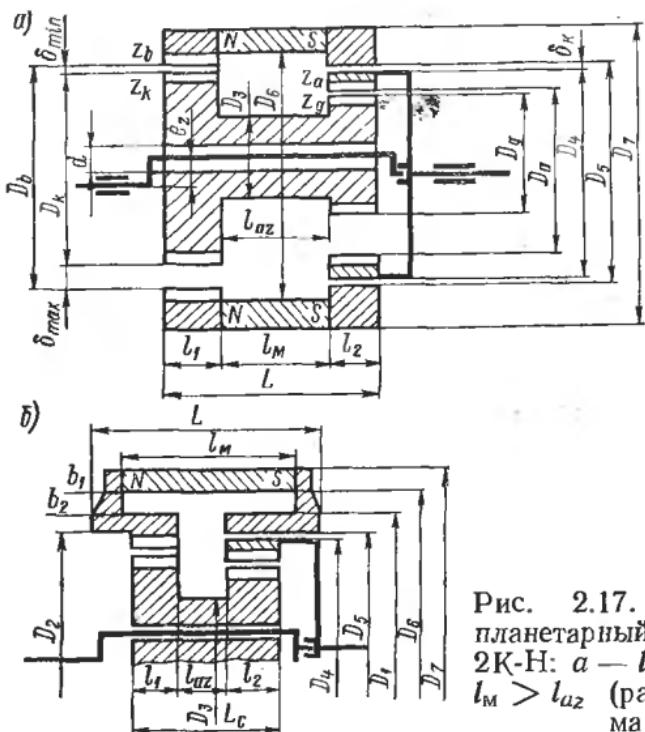


Рис. 2.17. Магнитный планетарный редуктор 2К-Н: а — $l_M = l_{az}$; б — $l_M > l_{az}$ (расчетная схема 11)

2.4 РАСЧЕТ ШАГОВЫХ РЕДУКТОРОВ

Шаговый редуктор состоит из наружного магнитопроводящего зубчатого колеса, внутреннего зубчатого колеса, выполненного из магнитно-мягких зубцов разделенных немагнитными промежутками, и магнитного коммутатора, перемещающего магнитный поток по поверхности внутреннего колеса. Одно из колес устанавливается неподвижно. Ведущим является вал коммутатора. Ведомым — вал вращающегося колеса. Число зубцов колес различно. Часть зубцов неподвижного и вращающегося колес распологается на одной оси с полюсами коммутатора. Зубцы между ними сдвинуты друг относительно друга на некоторый угол, определяемый соотношением чисел зубцов колес. При повороте коммутатора к соседнему зубцу вращающегося колеса происходит его подтягивание до согласованного положения зубцов колес. Так как величина рассогласования зубцов меньше шага зубцов неподвижного колеса, происходит уменьшение частоты вращения.

При числе зубцов неподвижного колеса большем, чем у подвижного, вращение ведомого вала происходит в сторону, обратную вращению ведущего. При числе зубцов неподвижного колеса меньшем, чем у подвижного, вращение ведомого вала происходит в сторону вращения ведущего.

Возможно выполнение многоступенчатых шаговых редукторов. Схема магнитной цепи ступени редукторов может быть разнообразной: с коммутатором в виде магнита «звездочка», из полосовых магнитов, с коммутатором в виде цилиндрического магнита с зубцовыми элементами, с электромагнитным возбуждением. В схемах с коммутатором, имеющим зубцовые элементы, для уменьшения пульсации передаваемого момента в зубцовых элементах зубцы колес целесообразно сдвинуть на половину зубцового шага.

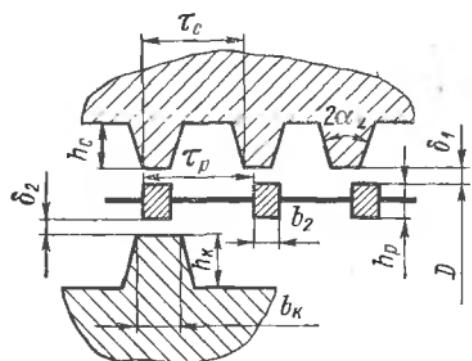


Рис. 2.18. Схема зубцовых элементов шагового редуктора

$$\text{при } z_c > z_p \quad i = \frac{z_p}{z_c - z_p} = \frac{z_{p1}}{z_{c1} - z_{p1}};$$

$$\text{при } z_p > z_c \quad i = \frac{z_p}{z_p - z_c} = \frac{z_{p1}}{z_{p1} - z_{c1}}.$$

Здесь z_p и z_{p1} — полное число зубцов в зубцовом элементе и число зубцов в одной зоне внутреннего колеса; z_c и z_{c1} — то же наружного колеса. Отсюда определяются значения z_{p1} и z_{c1} . Число зубцов в каждом зубцовом элементе: $z_p = p z_{p1}$; $z_c = p z_{c1}$, где p — число зон зубцов в зубцовом элементе, ограниченных зубцами с совпадающими осями, или число полюсов коммутатора. Численное значение p зависит от типа коммутатора.

Схема зубцовых элементов шагового редуктора показана на рис. 2.18. Зазоры δ_1 и δ_2 принимаются с учетом технологических особенностей изготовления редуктора. Соотношение размеров в зубцовом элементе следует принимать: $h_c \geq (3,5 \div 4,5) \delta_1$; $t_c = 6,65 \delta_1$; $2\alpha_2 = 24^\circ$; $h_p = 10\delta_1$; $b_z = 3\delta_1$; $\tau_p = 10\delta_2 + b_z$; $h_k = 10\delta_2$; $b_k = \tau_p$.

Отсюда следует, что

$$\tau_p - t_c = 10\delta_2 - 3,65\delta_1 \text{ и } D/p = iz_{c1}(10\delta_2 - 3,65\delta_1)/\pi = k_p.$$

Для обеспечения работоспособности редуктора необходимо, чтобы $\tau_p - t_c \ll b_z/2 \ll 3\delta_1$. Отсюда $D/p \ll 3\delta_1 iz_{c1}/\pi$.

Наименьшие размеры редуктора получаются при $|z_{p1} - z_{c1}| = 1$.

Момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$), передаваемый одним зубцом при рассогласовании на $0,5b_z$,

$$M_{\text{эм}} = 0,0304\pi DB_{z\delta}^2 l \delta_1 m / \mu_0.$$

Число полюсов коммутатора $p = D/k_p$

Момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$) всего редуктора

$$M = 0,0304 \frac{\pi}{k_p k_3} D^2 l \frac{B_{z\delta}^2}{\mu_0} \delta_1 m.$$

Произведение главных размеров редуктора (m^3)

$$D^2 l = \frac{1,315 \cdot 10^{-5} M k_p k_3}{B_{2\delta}^2 m \delta_1}.$$

Алгоритм расчета шагового редуктора: 1) принимаются величины δ_1 , δ_2 , $B_{2\delta}$; 2) рассчитывается геометрия зубцовых элементов; 3) подбираются по передаточному отношению числа зубцов z_{p1} и z_{c1} ; 4) определяется соотношение D/p ; 5) определяются l и D ; 6) определяется

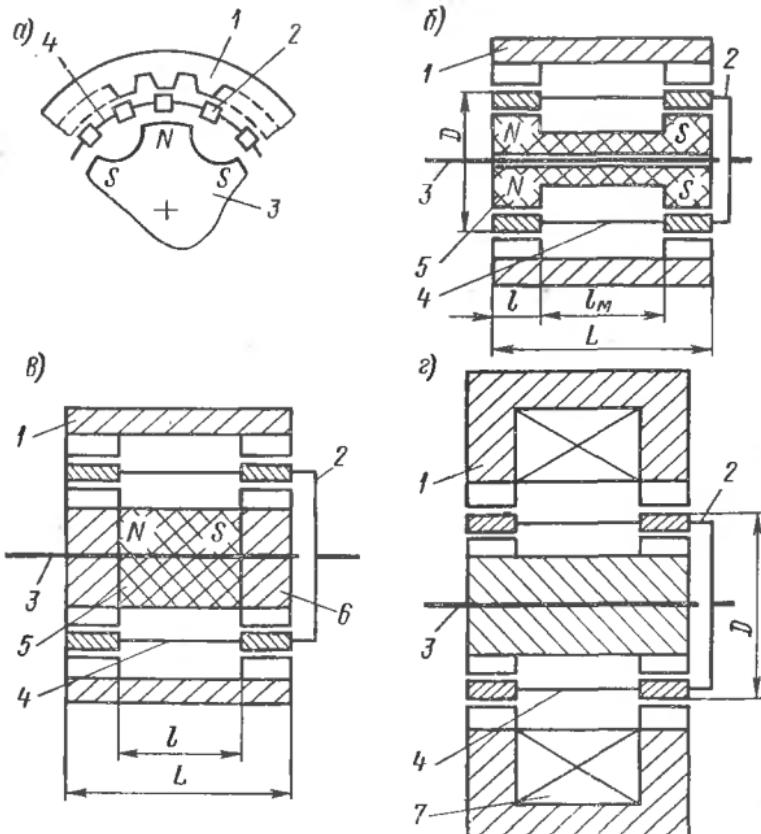


Рис. 2.19. Шаговые редукторы: а—с коммутатором-магнитом «звездочка»; б—с коммутатором из полосовых магнитов; в—с коммутатором в виде цилиндрического магнита с зубцовыми элементами; г—с электромагнитным возбуждением;

1 — неподвижное колесо-статор; 2 — ведомое колесо-ротор; 3 — коммутатор; 4 — немагнитная приставка; 5 — магнит; 6 — зубцовый элемент; 7 — обмотка возбуждения (расчетная схема 12)

число полюсов коммутатора; 7) методами, аналогичными приведенным в п. 2.1, производится расчет магнита или обмотки возбуждения и магнитопровода, обеспечивающих принятую индукцию в рабочем зазоре. Порядок расчета шаговых редукторов по расчетной схеме 12 (рис. 2.19) приведен в табл. 2.22 при следующих заданных параметрах: передаваемый момент M , Н·м; частота вращения на входе n_1 и на выходе n_2 , об/мин; запас по моменту k_3 .

Таблица 2.22. Порядок расчета шаговых редукторов по расчетной схеме 12 (см. рис. 2.19)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Передаточное отношение	$i = n_1/n_2$
2	Зазор между наружным и внутренним колесами δ_1 , м	По конструктивным соображениям
3	Зазор между коммутатором и внутренним колесом δ_2 , м	По конструктивным соображениям
4	Индукция в зазорах $B_{z\delta}$, Т	$B_{z\delta} = 0,8 \div 1,5$
5	Геометрия зубцов и коммутатора, м	$2\alpha_2 = 24^\circ; h_c \geq (3,5 \div 4,5) \delta_1; h_p \geq 10\delta_1; b_z = 3\delta_1; \tau_p = 10\delta_2 + b_z; \tau_c = 6,65\delta_1; h_k = 10\delta_2; b_k = \tau_p$
6	Числа зубцов колес в одной зоне z_{c1}, z_p	Подбираются по значению $i = \left| \frac{z_{p1}}{z_{c1} - z_{p1}} \right|$
7	Соотношение D/p	$D/p = \frac{iz_{c1}}{\pi} (10\delta_2 - 3,65\delta_1) = k_p$
8	Число рабочих зазоров m	В соответствии с принятой схемой редуктора
9	Произведение главных размеров редуктора $D^2 l$, м ³	$D^2 l = \frac{1,315 \cdot 10^{-5} M k_3 k_p}{B_{z\delta}^2 m \delta_1}$
10	Диаметр D , м	По конструктивным соображениям
11	Длина l , м	$l = (D^2 l)/D^2$
12	Число зубцовых зон (число полюсов коммутатора)	$p = D/k_p$ (для коммутатора «звездочка» — четное число)
13	Потеря н. с. в δ_1 и δ_2	$F_\delta = 0,8 (\delta_1 + \delta_2) B_{z\delta} 10^6$
14	F_δ , А	$\Phi_1 = B_{z\delta} b_z l$
15	Магнитный поток через один полюс коммутатора Φ_1 , Вб	$D_k \leq D - 2h_p - 2\delta_2$
16	Диаметр коммутатора D_k , м	См. п. 4.5
17	Марка магнита	По характеристикам магнита
	Параметры магнита: H_d , А/м B_d , Т	» » »

№ п.п.	Параметр	Формула
К о м м у т а т о р - м а г н и т « з в е з д о ч к а »		
18	Индукция в стали неподвижного колеса B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
19	Удельные потери н. с. в стали H_d , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
20	Сечение стали неподвижного колеса S_h , м ²	$S_h = \Phi_1 / (2B_a)$
21	Наружный диаметр неподвижного колеса D_h , м	$D_h = D + 2\delta_1 + 2h_c + 2S_h/l$
22	Длина пути магнитного потока l_a , м	$l_a = 2h_c + \pi (D_h - S_h/l)/p$
23	Потери н. с. в стали F_a , А	$F_a = H_d l_a$
24	Диаметр коммутатора D_k , м: при двухполюсном магните	$D_k = (2F_\delta + F_a)/H_d$
	при многополюсном магните	$D_k = (2F_\delta + F_a)/(H_d p^{-p_a})$, где $\rho_3 = 0,59 \div 0,64$
25	Толщина магнита h_m , м	$h_m = \Phi_1 \sigma / (2l B_d) \approx 0,5 b_k$, где $\sigma = 1,3 \div 1,4$
К о м м у т а т о р из полосовых магнитов		
26	Длина системы в осевом направлении L , м	$L \geq 2l + 10\delta_1$
27	Длина пути магнитного потока l_a , м	По эскизу редуктора
28	Индукция в стали наружного колеса B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
29	Удельные потери н. с. в стали H_a , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
30	Сечение стали наружного колеса S_h , м ²	$S_h = \Phi_1 p / B_a$
31	Наружный диаметр колеса D_h , м	$D_h =$
32	Длина пути магнитного потока l_a , м	$= \sqrt{[(D + 2\delta_1 + 2h_c)^2 \pi / 4 + S_h] 4 / \pi}$ $l_a \approx l_m + l$
33	Потери н. с. в стали F_a , А	$F_a = H_d l_a$
34	Длина магнита l_m , м	$l_m = (2F_\delta + F_a)/H_d$
35	Сечение магнита S_m , м ²	$S_m = \Phi_1 \sigma / B_d$
36	Диаметр вала d , м	По конструктивным соображениям

№ п.п.	Параметр	Формула
37	Проверка диаметра D_K , м	$D_K > \sqrt{(S_m p + \pi d^2/4) 4/\pi}$
Коммутатор в виде цилиндрического магнита с зубцовыми элементами		
38	Длина системы в осевом направлении L , м	$L \geq 2l + 10\delta_1$
39	Сечение стали наружного колеса S_H , м ²	См. п. 30
40	Наружный диаметр колеса D_H , м	См. п. 31
41	Длина пути магнитного потока l_a , м (по эскизу редуктора)	$l_a \approx l_m + l + D_H$
42	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
43	Потери н. с. в стали F_a , А	$F_a = H_a l_a$
44	Длина магнита l_m , м	$l_m = (2F_\delta + F_a)/H_d$
45	Сечение магнита S_m , м ²	$S_m = \Phi_1 p \sigma / B_d$
46	Диаметр вала d , м	По конструктивным соображениям
47	Проверка диаметра D_K , м	$D_K > \sqrt{(S_m + \pi d^2/4) 4/\pi} + 2h_k$
Система с электромагнитным возбуждением		
48	Длина системы в осевом направлении L , м	$L \geq 2l + 10\delta_1$
49	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,5$
50	Удельные потери н. с. в стали H_a , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
51	Сечение стали S_Π , м ²	$S_\Pi = \Phi_1 p / B_a$
52	Длина пути магнитного потока l_a , м	$l_a = 2L + D_H$
53	Потери н. с. в стали F_a , А	$F_a = l_a H_a$
54	Полные потери н. с. $\sum F$, А	$\sum F = F_a + 2F_\delta$
55	Обмотка возбуждения	По методике (см. п. 2.9)

РАСЧЕТ ПЕРЕМЕННО-ПОЛЮСНОЙ АКТИВНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МУФТЫ

Активные переменно-полюсные муфты выполняются со скобообразным или полосовыми литыми магнитами, но чаще всего с магнитом в виде звездочки. Муфта с магнитом в виде звездочки может быть выполнена с явно выраженным полюсами обеих полумуфт или с неявно выраженным полюсами одной из них. Во втором случае магнитные полюсы получают с помощью отливки магнитного сплава в магнитном поле и термомагнитной обработки. Намагничивание полумуфты производится по осям полюсов. Муфты выполняются с неявно выраженным полюсами для уменьшения гидравлических (вентиляционных) потерь.

При явно выраженных полюсах момент муфты складывается из двух составляющих — активной и реактивной [12]:

$$M = M_a + M_p,$$

где M_a — активная составляющая момента, $M_a = M_{a,\text{эм}} \sin p\gamma_p$; M_p — реактивная составляющая момента, $M_p = M_{p,\text{эм}} \sin 2p\gamma_p$; p — число пар полюсов магнита; γ_p — угол рассогласования полумуфт.

Активная составляющая момента возникает за счет взаимодействия разноименных полюсов полумуфт, реактивная — за счет изменения проводимости зазора на пути магнитного потока.

Таким образом,

$$M = M_{a,\text{эм}} \sin p\gamma_p + M_{p,\text{эм}} \sin 2p\gamma_p.$$

Общий момент увеличивается за счет реактивной составляющей незначительно, $p\gamma_p |_{\max} \approx 78^\circ$. Вследствие малости реактивную составляющую обычно не учитывают.

Из условий технологичности отливки магнита и его намагничивания число полюсов обычно не превышает $2p = 8$. Переменно-полюсные муфты с магнитом «звездочна» используются в микроприводах при частоте вращения не выше 10 000 об/мин (что соответствует наивысшей скорости вращения серийных микродвигателей постоянного тока). При этом отношение $a/\Delta \ll 0,1$ и влияние вихревых потерь в экране на момент и к. п. д. муфты пренебрежимо мало. Муфты могут рассчитываться по статическим зависимостям.

Электромагнитный момент [11]

$$M_{\text{эм}} = \frac{8 (\sum H l_m)^2 \mu_0 t D p}{\pi^2 b_{\text{п}}^2} f_{F_{x0}}(\alpha; \delta/\tau).$$

Здесь H — напряженность магнита; l_m — длина магнита; t — полюсное деление; D — диаметр внутренней полумуфты; p — число пар полюсов; $b_{\text{п}}$ — ширина паза; $f_{F_{x0}}(\alpha; \delta/\tau)$ — функция $\alpha = b/t$ и δ/τ , где b — ширина полюса; δ — рабочий зазор.

В многополюсных системах $\alpha = 0,5$; $\delta/\tau \ll 0,05 \div 0,025$. При этих соотношениях: $f_{F_{X_0}}(\alpha; \delta/\tau) = 8,5$, а произведение главных размеров

$$D^2 l = 13,8 \cdot 10^{-6} P k_3 k_m / (B_\delta^2 n).$$

Здесь $B_\delta = B_{bd}$, где B_{bd} — индукция внутреннего магнита в рабочей точке. При расчете магнитной цепи принимается, что магниты ведущей и ведомой полумуфт эквивалентны одному приведенному магниту с н. с., равной сумме н. с. магнитов, и с суммарным магнитным сопротивлением. Это допущение справедливо при работе обоих магнитов в одинаковых точках кривой размагничивания, для чего необходимо равенство н. с. магнитов. Так как геометрия полумуфт различна, длины магнитов неодинаковы, то для обеспечения равенства н. с. необходимо применение для магнитов полумуфт различных магнитных материалов. При этом внутренний магнит должен иметь H_d больше, чем наружный. Таким образом, $l_{h.m} H_{hd} \approx l_{b.m} H_{bd}$, где $l_{h.m}$ — длина наружного магнита по средней силовой линии; $l_{b.m}$ — то же внутреннего магнита; H_{hd} — напряженность наружного магнита; H_{bd} — то же внутреннего магнита.

Намагничивающая сила эквивалентного магнита

$$\sum H l_m = 2 l_{b.m} H_{bd}.$$

При намагничивании магнита до насыщения в намагничивающем устройстве и последующей сборке системы без размыкания полюсов магнита

$$2 l_{b.m} H_{bd} = 1,6 \cdot 10^6 \delta B_\delta.$$

Длина магнита в «звездочке» по средней силовой линии на пути намагничивания

$$l_{b.m} \approx D p^{-\rho_3},$$

где $\rho_3 = 0,59 \div 0,64$ (меньшие значения соответствуют меньшим p). Отсюда

$$p = [0,8 \cdot 10^6 \delta B_\delta / (D H_{bd})]^{1/\rho_3}.$$

Из условий равенства магнитного потока в магнитах полумуфт можно записать $0,5 b l B_\delta \approx B_{hd} l_{h.p} h_{h.m} = B_{bd} l_{b.p} h_{b.m}$. Здесь B_{hd} и B_{bd} — индукции наружного и внутреннего магнитов в рабочих точках; $l_{h.p}$ и $l_{b.p}$ — аксиальные длины наружного и внутреннего магнитов; $h_{h.m}$ и $h_{b.m}$ — толщины наружного и внутреннего магнитов. При $0,5 b \approx h_{h.m} = h_{b.m}$ $B_\delta = B_{bd}$. В многополюсных муфтах практически

$l_{\text{н.п}} = l_{\text{в.п}} = l$. Затем вычерчивается эскиз муфты. При этом расстояние между магнитами по впадинам должно быть не менее 108.

При расчете может быть оговорена толщина экрана a . Тогда, приняв по конструктивным соображениям размер δ' , можно определить число пар полюсов магнита $p = (\pi D/\delta')(\delta'/t)$ и проверить соответствие принятого диаметра, параметров магнита и числа пар полюсов.

При расчете двухполюсной муфты принимают: $l_{\text{в.м}} = D$; $h_{\text{в.м}} = (D - d_{\text{в}})/2$; ширина полюсного башмака $b = 2B_{\text{bd}}h_{\text{в.м}}/B_a$, где B_a — индукция в стали башмака. Обычно $B_a = 1,3 \div 1,6$ Т. По опыту проектирования в двухполюсных муфтах $\alpha = 0,15 \div 0,30$. При этом $t = 0,5\pi D$.

В ряде случаев δ/t имеет произвольную величину, так как δ может быть задана по технологическим соображениям.

Длина магнита наружной полумуфты

$$l_{\text{н.м}} = 0,5(D_{\text{м.ср}}\pi - 2b),$$

где $D_{\text{м.ср}}$ — средний диаметр магнита. Должно соблюдаться равенство $0,5(D_{\text{м.ср}}\pi - 2b)H_{\text{bd}} = DH_{\text{bd}}$.

Произведение главных размеров двухполюсной муфты

$$D^2l_{\text{в.п}} = 23,4 \cdot 10^5 \frac{Pk_{\text{м}}k_3}{H_{\text{bd}}^2 f_{F_{x0}}(\alpha; \delta/t) n},$$

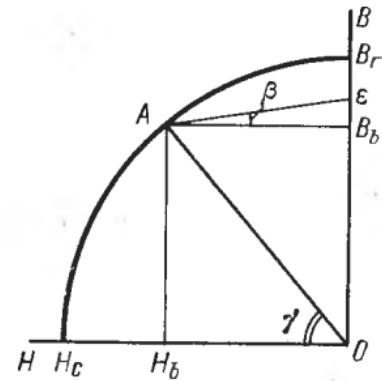


Рис. 2.20. Диаграмма эквивалентного магнита

$$\text{где } f_{F_{x0}}(\alpha; \delta/t) = \sum_{k=1, 3, 5}^{\infty} \frac{(-1)^{(k-1)/2} \cos^2(0,5k\pi\alpha)}{k^2 \operatorname{sh}(k\pi\delta/t)}.$$

Следует отметить, что практически магниты наружной и внутренней полумуфт часто выполняются из одного и того же сплава и поэтому работают в различных рабочих точках кривой размагничивания. Это вносит определенную погрешность в расчеты. В переменно-полюсных системах с литыми магнитами при сдвиге полумуфт происходит смещение рабочей точки магнита по линии возврата, вызванное значительным изменением проводимости рабочего зазора. Это должно быть учтено при определении н. с. и индукции магнита в рабочей точке. После определения размеров и величины зазора муфты необходимо проверить параметры рабочей точки магнита по его диаграмме (рис. 2.20).

При намагничивании магнитной системы до насыщения с магнитным шунтом или в сборе индукция магнита снижается по кривой намагничивания до точки A , соответствующей проводимости рабочего зазора. Точка A расположена на линии OA , образующей с осью H угол γ . При рассогласовании полюсов муфты на угол $p\gamma_{\text{р.макс}}$ проводимость рабочего зазора минимальна. В точке A индукция имеет значение B_t , напряженность — H_b . При уменьшении угла рассогласования полюсов полумуфт происходит увеличение проводимости зазора и магнитное

состояние системы определяется линией магнитного возврата AE . Известно, что

$$B_b/H_b = \lambda_{p\gamma_p} |_{\max} 2l_{\text{в.м}}/(l_{\text{в.п}} h_{\text{в.м}}) = \operatorname{tg} \gamma.$$

Отсюда $\gamma = \operatorname{arctg} (B_b/H_b)$.

Проводимость рабочего зазора

$$\lambda_{p\gamma_p} |_{\max} = 8\mu_0\tau l f_\lambda(\alpha; \delta/\tau)/(\pi^2 b_{\text{п}}),$$

где значения $f_\lambda(\alpha; \delta/\tau)$ могут быть рассчитаны по формуле

$$f_\lambda(\alpha; \delta/\tau) = \sum_{k=1, 3, 5}^{\infty} \frac{(-1)^{(k-1)/2} \cos(0,5k\pi\alpha) \cos(k\pi/4)}{k^2 \operatorname{sh}(k\pi\delta/2\tau)}.$$

Приняв значения δ/τ и α , при известных геометрических размерах системы можно определить $\lambda_{p\gamma_p} |_{\max}$, построить линию OA и определить B_b и H_b . При несовпадении принятых и полученных величин следует скорректировать размеры муфты до удовлетворительного совпадения.

В случае, если $a/\Delta > 0,1$ необходимо определить потери в экране и увеличить расчетную электромагнитную мощность муфты на половину мощности экрана. Потери в экране переменно-полюсной муфты могут быть определены по формуле

$$P_e = \left(\frac{B_\delta l_{\text{в.п}} D_{\text{в.ср}} \pi n}{30} \right)^2 \frac{2ba\gamma_e}{4l_{\text{в.п}} + 4b_{\text{п}} + \pi b},$$

где $b = \tau - b_{\text{п}}$. При $b = 0,5\tau$ $b = b_{\text{п}}$.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = (P + P_e)/P.$$

Ниже приведен порядок расчета муфт по расчетным схемам 13—14 (рис. 2.21—2.22, табл. 2.23—2.24) при следующих заданных параметрах: передаваемая мощность P , Вт; частота вращения n , об/мин; кратность пускового момента k_M ; коэффициент запаса k_3 , $k_3 \geq 1,65$; перепад давлений Δp , Па; материал экрана; удельная электропроводность γ_e , См/м; предел текучести σ_T , МПа; магнитная проницаемость μ_0 , Г/м; материал магнита наружной полумуфты; индукция ${}^1 B_{hd}$, Т; напряженность поля ${}^1 H_{hd}$, А/м; материал магнита внутренней полумуфты; индукция ${}^1 B_{bd}$, Т; напряженность поля ${}^1 H_{bd}$, А/м; рабочая температура муфты t , °С.

¹ По характеристикам магнита.

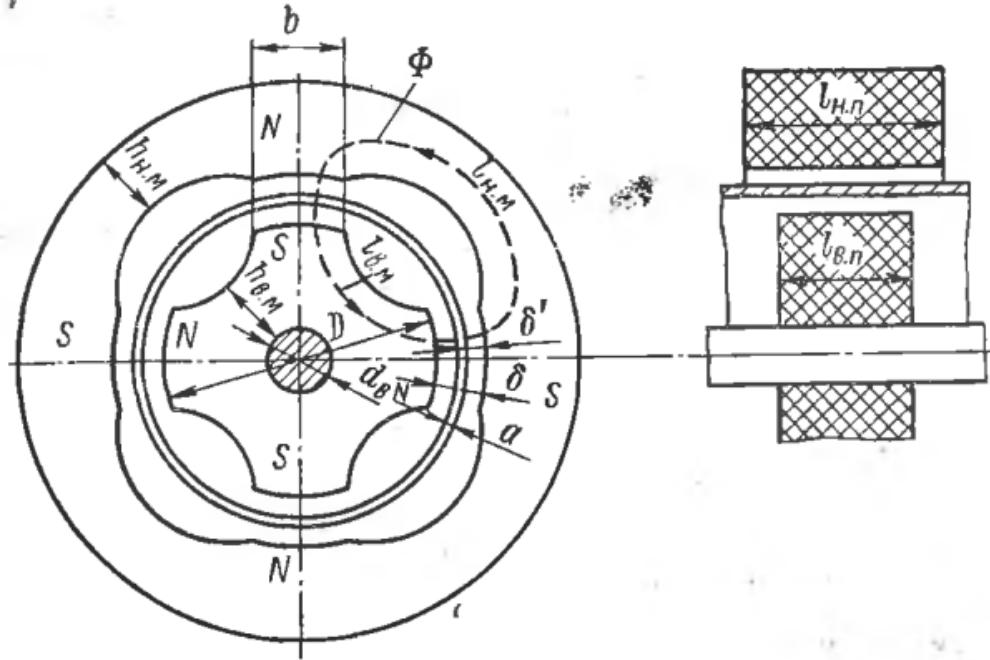


Рис. 2.21. Синхронная активная многополюсная цилиндрическая муфта с магнитом «звездочка» (расчетная схема 13)

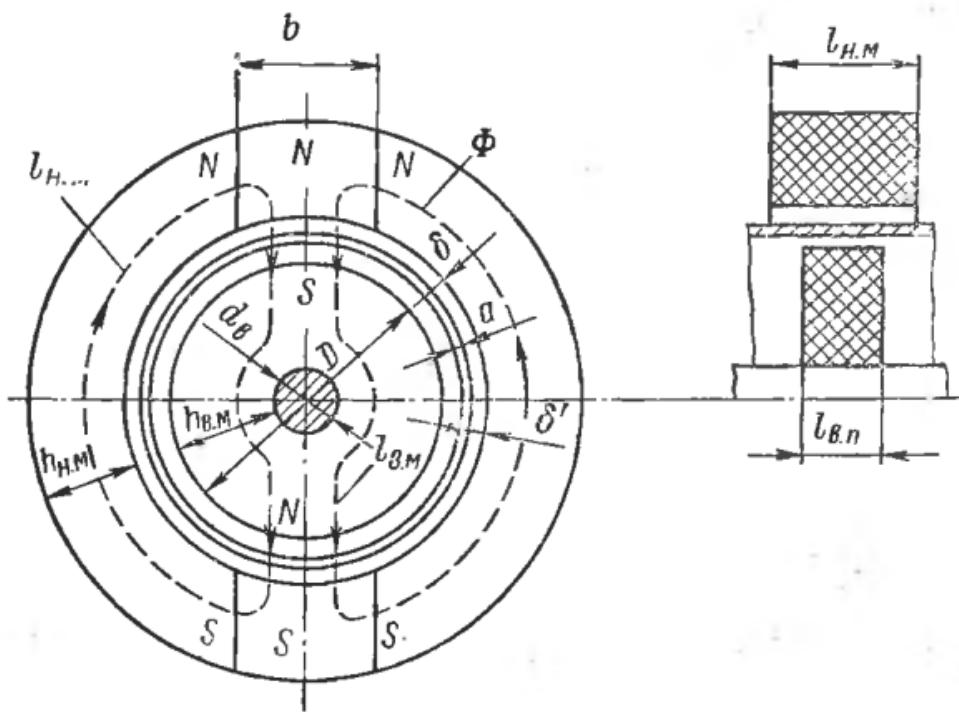


Рис. 2.22. Синхронная активная двухполюсная цилиндрическая муфта (расчетная схема 14)

Таблица 2.23. Порядок расчета муфты по схеме 13
(см. рис. 2.21)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Произведение главных размеров D^2l , м ³	$D^2l = 13,8 \cdot 10^{-6} P k_m k_3 / (B_{bd}^2 n)$
2	Диаметр внутренней полумуфты D , м	По конструктивным соображениям
3	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
4	Толщина экрана a , м	По расчету (см. п. 3.7) или по конструктивным соображениям
5	Рабочий зазор δ , м	$\delta = a + 2\delta'$
6	Число пар полюсов p	При $\delta/\tau = 0,05$ $p = 0,05\pi D/\delta$, $p = [0,8\delta B_\delta 10^6 / (DH_{bd})]^{-1/\rho_3}$, где $\rho_3 = 0,59 \div 0,64$; $B_\delta = B_{bd}$
7	Корректировка величины D , м	По значению p и δ
8	Длина полумуфты l , м	$l = (D^2l)/D^2$
9	Ширина полюсов b , м	$b = 0,5\tau$
10	Толщина внутреннего магнита $h_{b.m}$, м	$h_{b.m} = 0,5b$
11	Толщина наружного магнита $h_{n.m}$, м	$h_{n.m} = 0,5b B_{bd}/B_{nd}$
12	Длина магнита наружной полумуфты $l_{n.m}$, м	$l_{n.m} = D p^{-\rho_3} H_{bd}/H_{nd}$
13	Потери в экране P_3 , Вт	$P_3 = \left(\frac{B_\delta l D_{3, \text{ср}} \pi n}{30} \right)^2 \times \frac{2p\rho_3 ba}{4l + (4 + \pi)b}$
14	Коэффициент полезного действия муфты η	$\eta = (P + P_3)/P$
15	Размеры муфты, м	d_b — по конструктивным соображениям или по методике (см. п. 3.9); $D_1 = d_b + 2h_{b.m}$; $D_2 = D + 2\delta'$; $D_3 = D_2 + 2a$; $D_4 = D_3 + 2\delta'$; $D_5 \geq D_1 + 10\delta$; $D_6 = D_5 + 2h_{n.m}$

Примечания: 1. Число пар полюсов p должно быть целым ($p = 2 \div 4$). 2. При расчете неэкранированной системы п. 3 и 4 исключаются из расчета.

Таблица 2.24. Порядок расчета муфты по схеме 14
(см. рис. 2.22)

№ п/п	Параметр	Формула
1	Конструктивный зазор δ' , м	По конструктивным соображениям
2	Толщина экрана a , м	По конструктивным соображениям
3	Рабочий зазор δ , м	$\delta = 2\delta' + a$
4	Диаметр внутренней полумуфты D , м	$D = 1,6B_{bd}\delta 10^6/(2H_{bd})$
5	Полюсное деление τ , м	$\tau = 0,5\pi D$
6	Соотношение δ/τ	См. п. 3,5
7	Соотношение α	$\alpha = 0,15 \div 0,3$
8	Функция $f_{Fx_0}(\alpha; \delta/\tau)$	$f_{Fx_0}(\alpha; \delta/\tau) = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{(-1)^{(k-1)/2} \cos^2(0,5k\pi\alpha)}{k^2 \sinh(k\pi\delta/\tau)}$
9	Длина внутренней полумуфты $l_{в.п.}$, м	$l_{в.п.} = 23,4 \cdot 10^5 \times \frac{Pk_M k_3}{D^2 H_{bd}^2 f_{Fx_0}(\alpha; \delta/\tau) n}$
10	Ширина полюса b , м	$b = \alpha\tau$
11	Длина магнита наружной полумуфты $l_{н.м.}$, м	$l_{н.м.} = DH_{bd}/H_{нд}$
12	Средний диаметр магнита наружной полумуфты $D_{м.ср.}$, м	$D_{м.ср.} = 2(l_{н.м.} + b)/\pi$
13	Диаметр вала $d_{в.}$, м	По конструктивным соображениям или по методике (см. п. 3.9)
14	Толщина магнита внутренней полумуфты $h_{в.м.}$, м	$h_{в.м.} = b/2$
15	Длина наружной полумуфты $l_{н.п.}$, м	$l_{н.п.} \geq l_{в.п.}$
16	Толщина магнита наружной полумуфты $h_{н.м.}$, м	$h_{н.м.} = \frac{bB_{bd}l_{в.п.}}{2B_{нд}l_{н.п.}}$
17—18 19	См. табл. 23, п. 13—14 Размеры муфты, м	$d_{в.} = (0,2 \div 0,25) D; D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a; D_3 = D_2 + 2\delta'; D_4 = D_{м.ср.} - h_{н.м.}; D_5 = D_{м.ср.} + h_{н.м.}$

РАСЧЕТ МЕХАНИЗМОВ С МАГНИТАМИ ИЗ ФЕРРИТА БАРИЯ ИЛИ РЭМ

Механизмы состоят из двух частей, содержащих магнитные элементы с чередующейся на рабочей поверхности полярностью. Число магнитных элементов во взаимодействующих частях одинаково. Магнитные полюсы, противоположные рабочим поверхностям, замкнуты ферромагнитными корпусами. Ширина одного магнита $\tau = \delta/q$. Значение q зависит от величины δ и может быть определено по рис. 2.23.

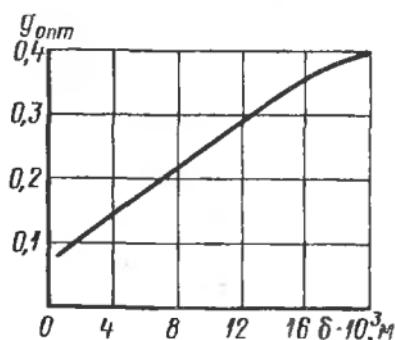
Длина магнита в направлении намагничивания при рабочей точке, совпадающей с точкой максимальной энергии, равна $l_m = 0,4 \cdot 10^6 \delta B_d / H_d$ или принимается ближайшая стандартная длина магнита при $l_m \geq$

$\geq (4 \div 1,8) \delta$. Затем следует найти параметры рабочей точки H_d и B_d . Для этого на характеристике $B = f(H)$ магнита проводится из начала координат линия под углом $\alpha = \arctg \frac{B_d m_B}{H_d m_H}$ к оси H . Здесь m_B и m_H — масштабные коэффициенты графика по осям B и H . Параметры точки пересечения линии и характеристики $B = f(H)$ определяют B_d и H_d . Толщина магнитопровода $b_m = 0,5\tau B_d / B_a$.

Момент ($\text{Н} \cdot \text{м}$), передаваемый торцовой муфтой,

$$M_{\text{эм}} = 2,16 \cdot 10^{-8} k D_2^3 I^2,$$

Рис. 2.23. Зависимость $q_{\text{опт}}$ от δ



где D_2 — наружный диаметр полумуфты, м; I — намагниченность магнита, A/m ; $I = B/\mu_0$ — H ; $k = f(\delta, q)$. Значения k приведены в табл. 2.25.

Момент ($\text{Н} \cdot \text{м}$), передаваемый цилиндрической муфтой,

$$M_{\text{эм}} = 1,54 \cdot 10^{-7} k l D^2 I^2,$$

где D — диаметр внутренней полумуфты, м; l — длина магнитов в осевом направлении, м.

Сила (Н), передаваемая плоским механизмом поступательного перемещения,

$$F_{\text{эм}} = k l L I^2 10^{-7},$$

где L — длина механизма в направлении перемещения, м.

При расчете механизмов, приняв предварительно толщину экрана и конструктивные зазоры, определяем рабочий зазор муфты δ . Зная зазор δ , находим по рис. 2.23 величину $q_{\text{опт}}$. Затем по табл. 2.25 определяем значение коэффициента k , соответствующего $q_{\text{опт}}$. Приняв материал магнита, по заданному моменту определяем главные размеры механизмов или их произведения для торцовой муфты

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{M k_3 k_{\text{п.м.}}}{2,16 \cdot 10^{-8} k I^2}},$$

Таблица 2.25. Значения коэффициента k

$\delta \cdot 10^3, \text{м}$	k при q							
	0,1	0,125	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
3	2,76	2,78	2,65	2,4	2,12	1,99	1,6	1,32
4	2,62	2,66	2,61	2,36	2,06	1,91	1,56	1,29
5	2,28	2,36	2,44	2,33	2,04	1,76	1,52	1,27
6	2,08	2,28	2,3	2,28	2,01	1,65	1,48	1,26
8	1,54	1,61	1,69	1,97	1,86	1,59	1,42	1,23
10	1,14	1,2	1,36	1,46	1,65	1,55	1,28	1,14
12	0,96	0,99	1,02	1,12	1,28	1,28	1,17	1,06
14	0,82	0,85	0,88	0,96	1,01	1,14	1,09	1,01
16	0,74	0,78	0,84	0,89	0,95	0,98	0,98	0,92
20	0,62	0,67	0,71	0,74	0,79	0,81	0,81	0,76

для цилиндрической муфты

$$D^2 l = \frac{M k_3 k_{n.m}}{1,54 \cdot 10^{-7} k I^2};$$

для механизма поступательного перемещения

$$Ll = \frac{F k_3}{k I^2 10^{-7}}.$$

Зная δ и q , можно определить τ , I_m , b_m , а затем и число магнитов $2p$. Потери в экране могут быть определены по формулам:
для цилиндрической муфты

$$P_s = \left(\frac{\pi D_{s,\text{ср}} n}{30} l B_d \right)^2 \frac{\gamma_s \tau a}{4I + \pi \tau} p,$$

где $D_{s,\text{ср}}$ — средний диаметр экрана;

для торцовой муфты

$$P_s = 1,93 \cdot 10^{-4} p B_d^2 n^2 D_s^3 \gamma_s \alpha \tau / (0,5 + 0,3 \pi^2 / p);$$

для плоского поступательного механизма

$$P_s = 4B_d^2 l^2 v^2 p \gamma_s \alpha \tau / (4l + \pi \tau).$$

Коэффициент полезного действия муфты $\eta = P / (P + P_s)$.

В табл. 2.26 приведены главные размеры ряда муфт с магнитами из феррита бария ЗБА [42].

Ниже приведен порядок расчета механизмов по расчетным схемам 15—17 (рис. 2.24—2.26, табл. 2.27—2.29), при следующих параметрах: передаваемая мощность P , Вт; частота вращения n , об/мин; кратность

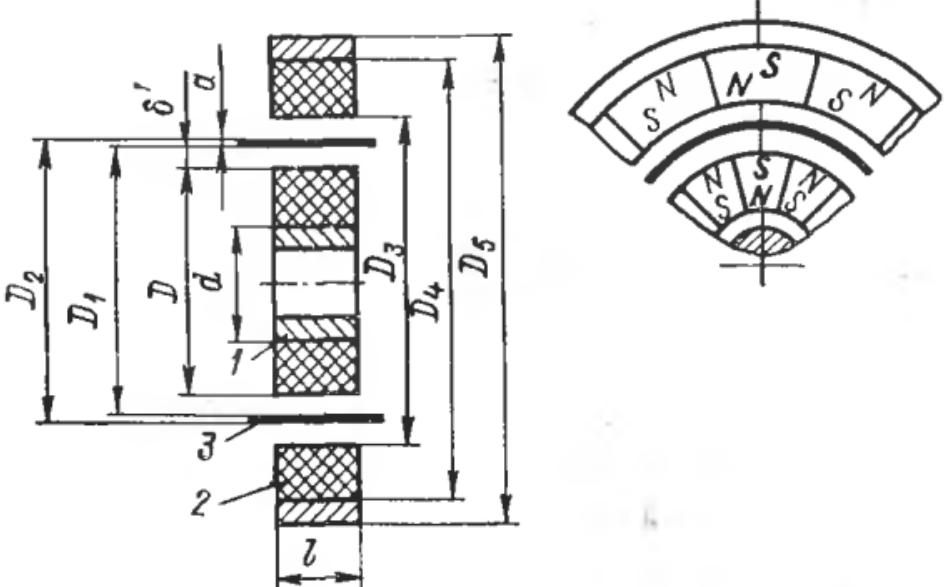


Рис. 2.24. Синхронная переменно-полюсная активная цилиндрическая муфта:
1 — ферромагнитный корпус; 2 — магнит; 3 — экран (расчетная схема 15)

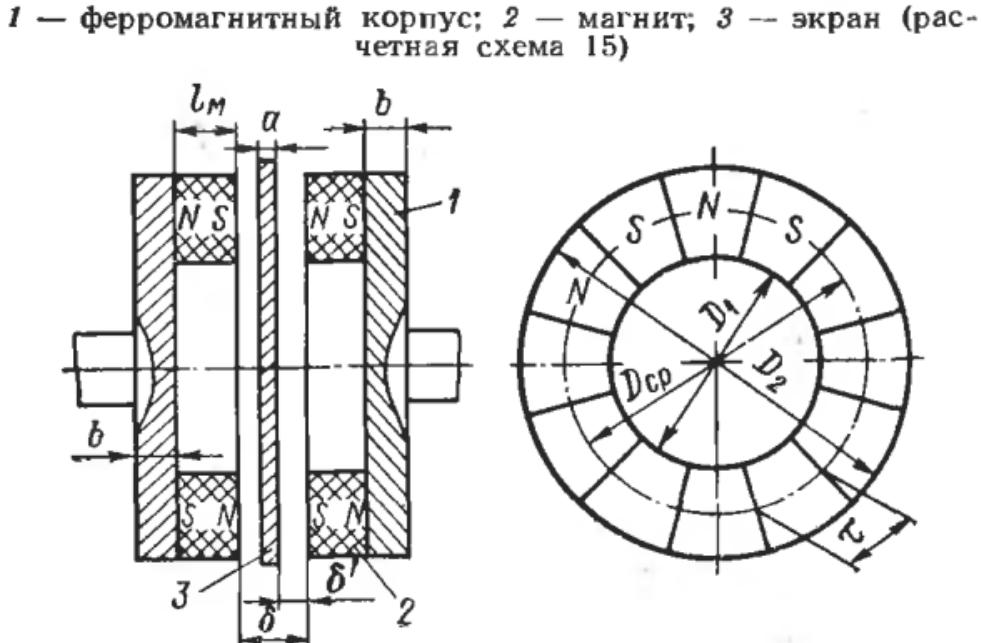


Рис. 2.25. Синхронная переменно-полюсная активная торцовая муфта:
1 — ферромагнитный диск; 2 — магнит; 3 — экран (расчетная схема 16)

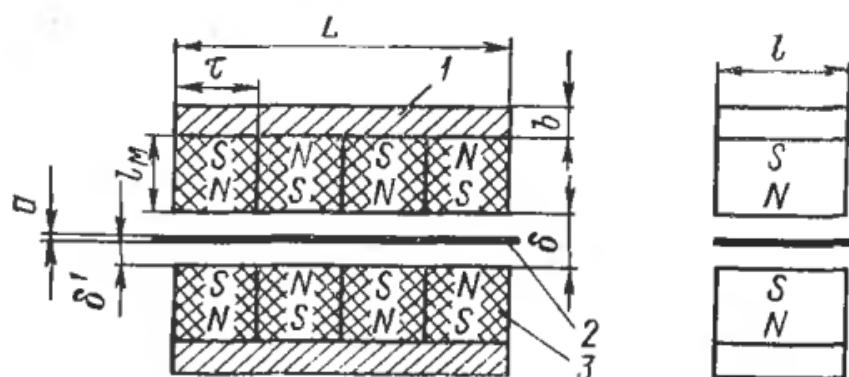


Рис. 2.26. Синхронный переменно-полюсный плоский механизм поступательного перемещения:
1 — ферромагнитное основание; 2 — экран; 3 — магнит (расчетная схема 17)

Таблица 2.26. Главные размеры цилиндрических муфт с магнитами из феррита барив марки ЗБА

Передаваемый мо- мент M_3 , Н.м	Наружный диаметр внутренней полу- муфты D	Внутренний диаметр наружной полумуф- ты D_s	Длина магнитов l	Рабочий зазор δ	Число полюсов $2p$							
						Передаваемый мо- мент M_3 , Н.м	Наружный диа- метр внутренней полумуфты D	Внутренний диа- метр наружной полумуфты D_s	Длина магнитов l	Рабочий зазор δ	Число полюсов $2p$	
						мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
3	60	69	40	4,5	6	75	190	203	120	6,5	18	
5	82	91	40	4,5	10	100	210	223	120	6,5	20	
8	82	91	60	4,5	10	140	250	263	120	6,5	24	
16	115	124	60	4,5	12	180	280	293	120	6,5	30	
25	140	149	60	4,5	16	100	250	267	120	8,5	24	
50	170	179	80	4,5	18	140	280	297	120	8,5	30	
75	170	179	120	4,5	18	180	330	347	120	8,5	30	
25	140	153	80	6,5	16	250	380	397	120	8,5	36	
50	190	203	80	6,5	18							

Таблица 2.27. Порядок расчета муфты по схеме 15
(см. рис. 2.24)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Толщина экрана a , м	Принимается по конструктив- ным соображениям
2	Конструктивные зазоры δ' , м	Принимается по конструктив- ным соображениям
3	Рабочий зазор δ , м	$\delta = a + \delta'$
4	Оптимальное значение коэффициента q	По рис. 2.23
5	Ширина магнита τ , м	$\tau = \delta/q$ (См. табл. 2.25)
6	Коэффициент k	
7	Длина магнита l_m , м	$l_m = (4 \div 1,8) \delta$
8	Отношение B_d/H_d	$B_d/H_d = l_m/(0,4 \cdot 10^6 \delta)$
9	Угол α	$\alpha = \arctg \frac{B_d m_B}{H_d m_H}$
10	Параметры рабочей точ- ки магнита B_d , Т; H_d , А/м	По характеристике магнита $B =$ $= f(H)$
	Индукция в стали магни- топровода B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,4$

№ п.п.	Параметр	Формула
11	Толщина магнитопровода b_m , м	$b_m = 0,5\tau B_d / B_a$
12	Передаваемый момент M , Н·м	$M = 9,55P/n$
13	Произведение главных размеров D^2l , м ³	$D^2l = \frac{Mk_3 k_{\text{п.м}}}{1,54 \cdot 10^{-7} k I^2}$
14	Диаметр D , м	По конструктивным соображениям
15	Проверочный расчет толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
16	Длина муфты l , м	$l = (D^2l)/D^2$
17	Число полюсов $2p$	$2p = \pi D/\tau$
18	Размеры муфты, м	$d = D - 2l_m; D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a; D_3 = D_2 + 2\delta'; D_4 = D_3 + 2l_m; D_5 = D_4 + 2b_m$
19	Потери в экране P_s , Вт	$P_s = \left[\frac{\pi (D_1 + a) n}{30} l B_d \right]^2 \times \frac{\tau \gamma_s a p}{4l + \pi \tau}$
20	Коэффициент полезного действия муфты η	$\eta = P/(P + P_s)$

Таблица 2.28. Порядок расчета муфты по схеме 16 (см. рис. 2.25)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—12	См. табл. 2.27, п. 1—12	—
13	Диаметр D_2 , м	$D_2 = \sqrt[3]{\frac{Mk_3 k_{\text{п.м}}}{2,16 \cdot 10^{-8} k I^2}}$
14	Диаметр D_1 , м	$D_1 = 0,5D_2$
15	Число полюсов $2p$	$2p = \pi (D_1 + D_2)/(2\tau)$
16	Проверочный расчет толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
17	Потери в экране P_s , Вт	$P_s = 1,93 \cdot 10^{-4} p B_d^2 n^2 D_2^3 \gamma_s \times \alpha \tau / (0,5 + 3\pi^2 / 16p)$
18	Коэффициент полезного действия муфты η	$\eta = P/(P + P_s)$

Таблица 2.29. Порядок расчета механизма по схеме 17
(см. рис. 2.26)

№ п.п.	Формула	Параметр
1—11	См. табл. 2.27, п. 1—11	
12	Произведение главных размеров, м ²	$Ll = Fk_3/(kI^2 \cdot 10^{-7})$
13	Длина L , м	По конструктивным соображениям
14	Длина магнита l , м	$l = Ll/L$
15	Проверочный расчет толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
16	Число полюсов $2p$	$2p = L/\tau$
17	Потери в экране P_s , Вт	$P_s = 4B_d^2 l^2 v^2 a \gamma_s \tau p / (4l + \tau \pi)$
18	Коэффициент полезного действия η	$\eta = P/(P + P_s)$

пускового момента $k_{\text{п.м.}}$; коэффициент запаса k_3 ; перепад давлений Δp , Па; материал экрана; удельная электропроводность γ_s , С/м; предел текучести σ_t , МПа; магнитная проницаемость μ_s , Г/м; материал магнита; намагниченность I , А/м (по характеристике магнита).

Для расчета механизма по схеме 51 вместо мощности P задается передаваемая сила F , Н; вместо частоты вращения n — линейная скорость v , м/с.

2.7

РАСЧЕТ МАГНИТНО-ГИСТЕРЕЗИСНОЙ МУФТЫ ВРАЩЕНИЯ

Обычно индуктор, содержащий постоянный магнит, входит в состав ведущей полумуфты. Гистерезисные слои располагаются в ведомой полумуфте.

При запуске, т. е. вращении ведущей полумуфты и неподвижной ведомой, частота перемагничивания гистерезисного слоя

$$f_1 = p\omega_1/2\pi,$$

где p — число пар полюсов индуктора; ω_1 — угловая скорость индуктора, р/с.

Мощность (Вт), выделяемая в гистерезисном слое, составит

$$P_{\Gamma 1} = p_{\Gamma} f_1 V_{\Gamma} 10^6,$$

где p_{Γ} — удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания, Вт/(см³· Гц); V_{Γ} — объем перемагничиваемого гистерезисного слоя, см³.

Передаваемый за счет потерь на гистерезис момент (Н·м)

$$M_{\Gamma} = pp_{\Gamma} V_{\Gamma} 10^6 / 2\pi.$$

При вращении ведомой полумуфты с угловой скоростью ω_2 , не равной скорости индуктора ω_1 , происходит скольжение ведомой полумуфты относительно ведущей. Передаваемый момент, если пренебречь вихревыми токами в ведомой полумуфте, не зависит от скорости вращения. В реальной муфте при этом также существует пусковой асинхронный момент, обусловленный наличием наведенных в гистерезисном слое вихревых токов. В синхронном режиме (при $\omega_1 = \omega_2$) передаваемый момент может быть записан в виде

$$M_{\Gamma} = c F_i \Phi_{\delta} \sin \theta,$$

где θ — угол между осями полюсов индуктора и наведенных полюсов гистерезисного слоя (θ_{\max} пропорционален углу магнитного запаздывания гистерезисного материала γ_{Γ}); c — постоянный конструктивный коэффициент; F_i — намагничающая сила индуктора; Φ_{δ} — магнитный поток в воздушном зазоре муфты.

При моменте нагрузки больше M_{Γ} муфта переходит в асинхронный режим с постоянным гистерезисным моментом. При этом сохраняется $\theta \equiv \gamma_{\Gamma}$, но полюсы в гистерезисном слое перемещаются. Принимается, что расчетный момент муфты

$$M = M_{\Gamma} / k_{m.z},$$

где $k_{m.z}$ — перегрузочная способность муфты (принимается в зависимости от назначения передачи), $k_{m.z} = k_m k_3$. Поэтому расчетный момент муфты (Н·м)

$$M = pp_{\Gamma} V_{\Gamma} 10^6 / (2\pi k_{m.z}).$$

Удельные потери на гистерезис $P_{\Gamma} = A_{\Gamma} B_{\Gamma}^2$, где A_{Γ} — коэффициент, определяющий свойства материала, равный удельным потерям на гистерезис при индукции $B_{\Gamma} = 1$ Т.

При расчете необходимо определить объем V_{Γ} и рассчитать магнитную систему так, чтобы обеспечить работу магнита индуктора в точке максимальной энергии, а гистерезисного материала — исходя из условий перемагничивания по оптимальному гистерезисному циклу с оптимальными индукцией и напряженностью.

Расчет параметров индуктора и объема V_{Γ} зависит от типа индуктора. Рассмотрим следующие варианты магнитной системы индуктора:

- I) внутренний индуктор с магнитом типа «звездочка»;

- 2) внутренний индуктор с радиальными магнитами и полюсными наконечниками или без них;
- 3) когтеобразный индуктор с магнитом в виде втулки;
 - 4) наружный индуктор с радиальными магнитами;
 - 5) наружный двухполюсный индуктор;
 - 6) индуктор с зубцовыми элементами и многозонным тангенциальным перемагничиванием. Зубцы в разноименных элементах индуктора сдвинуты на половину зубцового деления.

Во всех вариантах, кроме шестого, возможно как радиальное, так и тангенциальное перемагничивание гистерезисного слоя. При радиальном перемагничивании гистерезисный материал установлен в магнитно-мягкий корпус. Магнитный поток пересекает гистерезисный материал

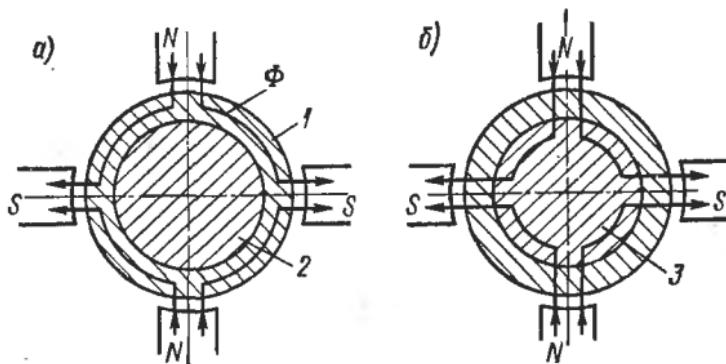


Рис. 2.27. Намагничивание гистерезисного слоя: а — тангенциальное; б — радиальное;

1 — гистерезисный слой; 2 — немагнитный корпус; 3 — магнитопроводящий корпус

по радиусу и замыкается по корпусу. При тангенциальном намагничивании гистерезисного слоя корпус выполнен немагнитным и поток замыкается по гистерезисному слою. Схемы замыкания магнитного потока при различных видах намагничивания показаны на рис. 2.27. В конструкциях обычно $l/D = 0,5 \div 2,5$, где l и D — длина и диаметр внутренней полумуфты. Ниже приведен порядок расчета муфт с различными вариантами индукторов по расчетным схемам 18—23 (рис. 2.28—2.33, табл. 2.30—2.41) при следующих заданных параметрах: передаваемая мощность P , Вт; частота вращения n , об/мин; кратность пускового момента, k_m ; коэффициент запаса k_3 ; перепад давлений Δp , Па; материал экрана; удельная электропроводность γ_s , См/м; предел текучести σ_t , МПа; магнитная проницаемость μ_s , Г/м; материал магнита; расчетная индукция ¹ B_d , Т; напряженность поля ¹ H_d , А/м; материал гистерезисного слоя; удельные потери на гистерезис ² p_r , Вт/(см³. Гц); оптимальная индукция ² B_r , Т; оптимальная напряженность ² H_r , А/м; рабочая температура муфты t , °С.

¹ По характеристикам магнита.

² По характеристикам гистерезисного материала.

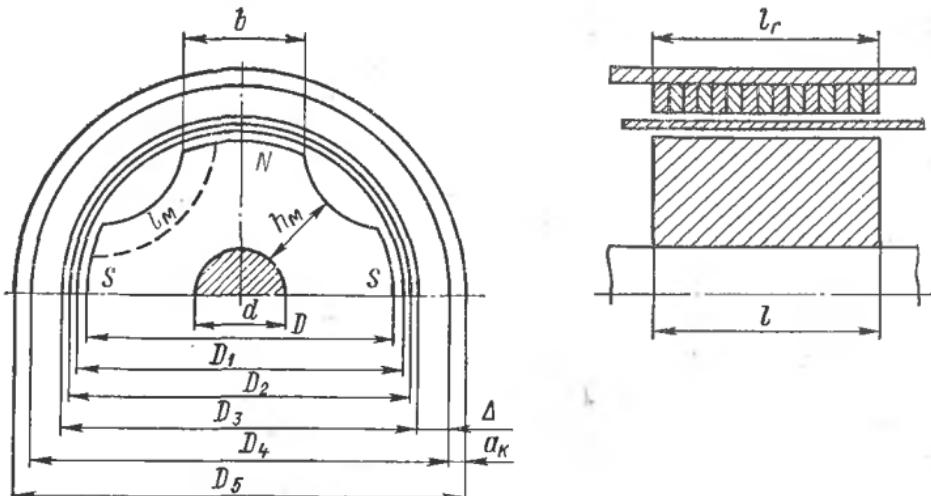


Рис. 2.28. Магнитно-гистерезисная цилиндрическая муфта с магнитом типа «звездочка» (расчетная схема 18)

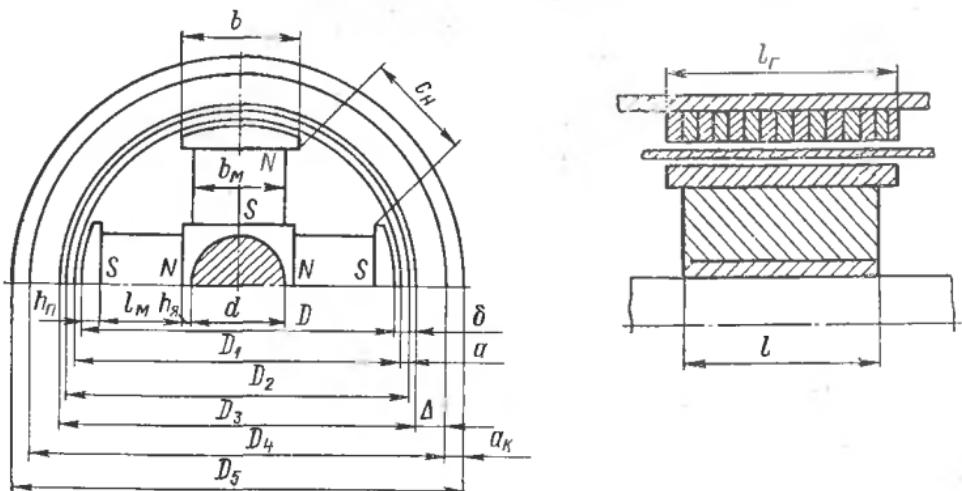


Рис. 2.29. Магнитно-гистерезисная цилиндрическая муфта с внутренним индуктором и радиальными магнитами (расчетная схема 19)

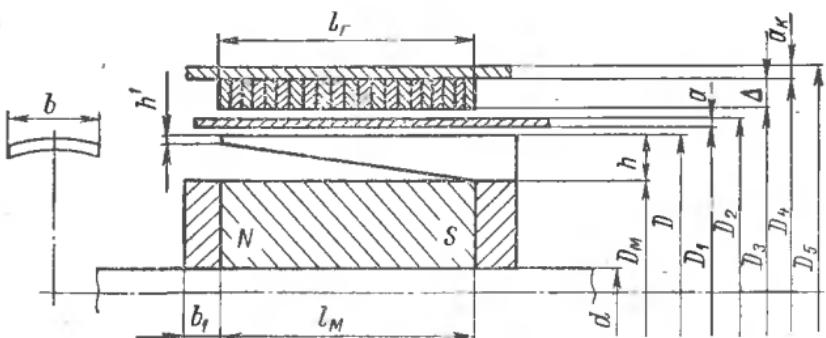


Рис. 2.30. Магнитно-гистерезисная цилиндрическая муфта с когтеобразным индуктором (расчетная схема 20)

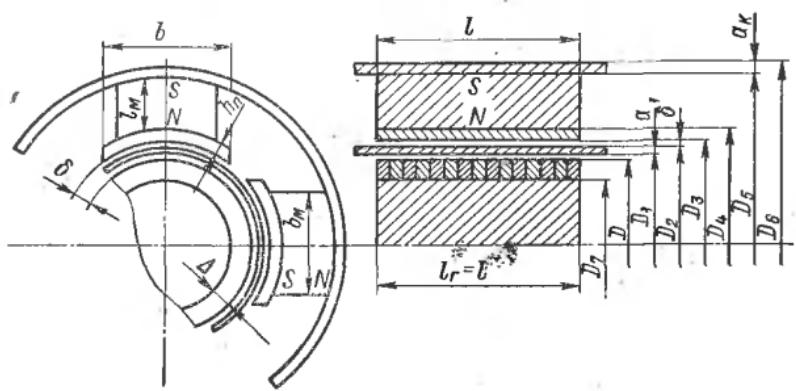


Рис. 2.31. Магнитно-гистерезисная цилиндрическая муфта с наружным индуктором и радиальными магнитами (расчетная схема 21)

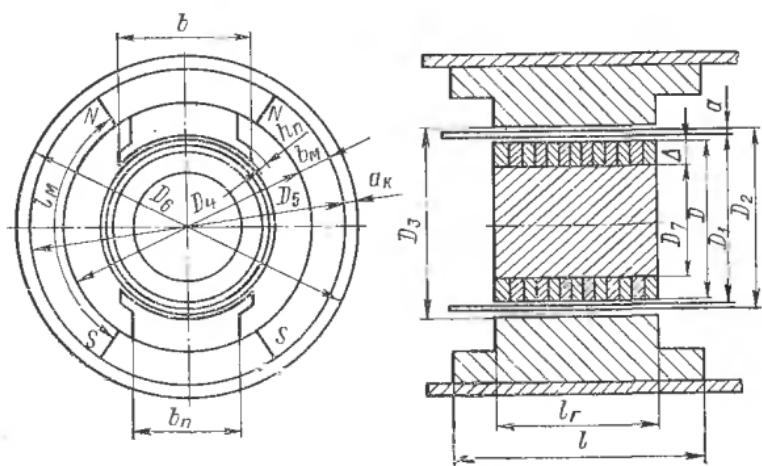


Рис. 2.32. Магнитно-гистерезисная цилиндрическая муфта с наружным двухполюсным индуктором со скобообразными магнитами (расчетная схема 22)

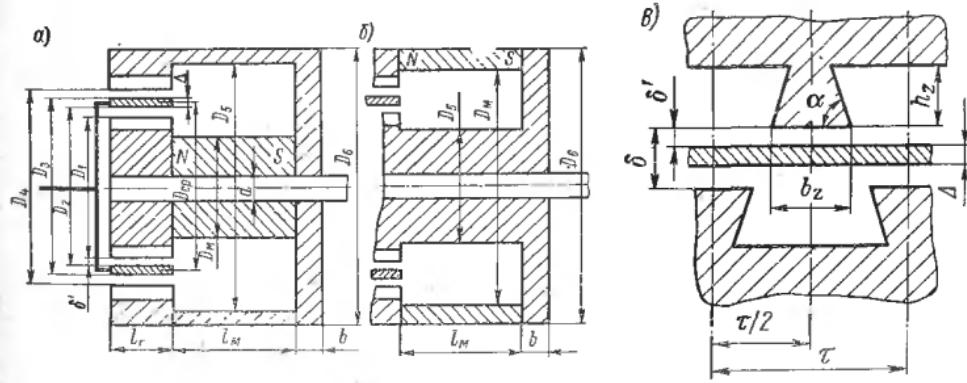


Рис. 2.33. Магнитно-гистерезисная цилиндрическая муфта с зубцовыми элементами и многозонным тангенциальным перемагничиванием:
 а — с внутренним магнитом; б — с наружным магнитом; в — оптимальная геометрия зубцов (расчетная схема 23)

Таблица 2.30. Порядок расчета муфты с радиальным намагничиванием по схеме 18 (см. рис. 2.28)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Передаваемый момент M , Н·м	$M = 9,55Pk_3k_M/n$
2	Число пар полюсов p	$p = 2 \div 4$
3	Объем гистерезисного материала V , м ³	$V = 2\pi M/(pp_T 10^6)$
4	Коэффициент заполнения гистерезисным материалом k_{3p}	$k_{3p} = 0,94 \div 1$
5	Коэффициент полюсного перекрытия α	$\alpha = 0,65 \div 0,85$
6	Произведение главных размеров муфты, м ³	$D \Delta l_T = V/(\pi a k_{3p})$
7	Толщина гистерезисного слоя Δ , м	По конструктивным соображениям
8	Толщина экрана a , м	По конструктивным соображениям
9	Конструктивные зазоры δ' , м	По конструктивным соображениям
10	Рабочий зазор δ , м	$\delta = 2\delta' + a$
11	Индукция в стали корпуса B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,4$
12	Удельная н. с. в стали корпуса, соответствующая индукции B_a , H_a , А/м	По кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
13	Диаметр D , м	$D = \frac{1,66B_T 10^6 + 2H_T \Delta + (\delta + \Delta) H_a / p}{H_d b^{p-3} - \frac{\pi H_a}{2p} - \frac{\pi^2 H_a \alpha}{8p^2}} \times \frac{B_T}{B_a} k_{3p}$
14	Проверка числа пар полюсов p	$p \leq \pi D (1 - \alpha) / (30\delta)$
15	Длина гистерезисного слоя l_T , м	$l_T = (D \Delta l_T) / (D \Delta)$
16	Длина магнита l , м	$l = B_T k_{3p} l_T / B_d$
17	Проверка толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
18	Ширина полюса b , м	$b = \pi D \alpha / (2p)$
19	Ширина h_M , м	$h_M = (1,05 \div 1,1) b/2$
20	Диаметр вала d , м	$d = (0,2 \div 0,25) D$

№ п.п.	Параметр	Формула
21	Толщина магнитопровода a_k , м	$a_k = \frac{\pi D}{4p} \alpha \frac{B_r}{B_a} k_{3\pi}$
22	Размеры, м	$D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a; D_3 = D_2 + 2\delta'; D_4 = D_3 + 2\Delta; D_5 = D_4 + 2a_k$
23	Потери в экране P_s , Вт	$P_s = \left[\frac{B_r l (D_1 + a) \pi n}{30} \right]^2 \times \frac{2p\gamma_s ab}{4l + (4 + \pi)b}$
24	Коэффициент полезного действия η	$\eta = (P + P_s)/P$

Таблица 2.31. Порядок расчета муфты с тангенциальным намагничиванием по схеме 18 (см. рис. 2.28)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—5	См. табл. 2.30, п. 1—5	—
6—9	См. табл. 2.30, п. 7—10	—
10	Диаметр D , м	$D = \frac{H_r \pi (2\delta + \Delta)/(2p) + 1,6\delta B_d 10^6}{H_d p - p_3 - H_r \pi/(2p)}$
11	Проверка числа пар полюсов p	$p \leq \pi D (1 - \alpha)/(30\alpha)$
12	Проверка Δ , м	$\Delta \leq 0,5 (D + 2\delta) (\sqrt[4]{1,55} - 1)$
13	Длина гистерезисного слоя l_r , м	$l_r = \frac{V}{\pi \Delta (D + 2\delta + \Delta) k_{3\pi}}$
14	Длина магнита l , м	$l = \frac{B_r \Delta l_r k_{3\pi}}{B_a \pi D \alpha / (4p)}, l \approx k_{3\pi} l_r$
15—18	См. табл. 2.30, п. 17—20	—
19	Толщина корпуса a_k , м	По конструктивным соображениям
20—22	См. табл. 2.30, п. 22—24	—

Таблица 2.32. Порядок расчета муфты с радиальным намагничиванием по схеме 19 (см. рис. 2.29)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—12	См. табл. 2.30, п. 1—12	—
13	Потери н. с. в стали полюсного наконечника H_1 , А/м	Соответственно индукции B_r по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
14	Потери н. с. в стали ярма H_2 , А/м	Соответственно индукции B_d
15	Коэффициент полюсного перекрытия по наружному диаметру магнитов α_m	$\alpha_m = b_m/\tau$, $\alpha_m = 0,5 \div 0,55$
16	Коэффициент высоты полюсного наконечника k_h	$k_h = h_n/D$, $k_h = 0,05 \div 0,075$
17	Диаметр D , м	$D = A/B$, где $A = 2\Delta H_r + 1,68B_r 10^6 + H_a(\delta + \Delta)\pi/p$, $B = \frac{\pi(1 - \alpha_m)(1 - 2k_h)}{2p \sin(\pi/2p)} \times$ $\times (H_d + p^{-\rho_3}H_2) - 0,5\pi H_a \times$ $\times \left(1 + \frac{\pi}{4p}\alpha \frac{B_r}{B_a} k_{3\Pi}\right)/p -$ $- 2k_h H_1 + H_2 p^{-\rho_3}(2k_h - 1)$ $l = \frac{\pi D(1 - \alpha_m)(1 - 2k_h)}{4p \sin(\pi/2p)}$ $h_n = k_h D$
18	Длина магнита l_m , м	
19	Высота полюсного наконечника h_n , м	
20	Ширина полюсного наконечника b , м	$b = (D - 2h_n) \sin \frac{\alpha\pi}{2p}$
21	Ширина магнита b_m , м	$b_m = \pi D \alpha_m / (2p)$
22	Минимальное расстояние между полюсами c_i , м	$c_i = \frac{\pi}{2p}(D - h_n) - b \leq 158$
23	Длина гистерезисного слоя l_r , м	$l_r = (D\Delta l_r)/(D\Delta)$
24	Длина магнита l , м	$l = \frac{B_r b_l r k_{3\Pi}}{B_d b_m}$
25	Проверка толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
26—30	См. табл. 2.30, п. 20—24	—

Таблица 2.33. Порядок расчета муфты с тангенциальным намагничиванием по схеме 19 (см. рис. 2.29)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—5	См. табл. 2.30, п. 1—5	—
6—9	См. табл. 2.30, п. 7—10	—
10—13	См. табл. 2.32, п. 13—16	—
14	Диаметр D , м	$D = A/B$, где $A = 1,68B_r 10^6 + 0,5\pi(2\delta + \Delta)H_r/p$, $B = \frac{\pi(1 - \alpha_m)(1 - 2k_h)H_d}{2p \sin \pi/(2p)} - 0,5H_r/p - 2k_h H_1 -$ $- \left[1 - 2k_h - \frac{\times(1 - 2k_h)}{2p \sin \pi/(2p)} \right] \times p^{-\rho_s} H_2$ $\Delta \leqslant 0,5(D + 2\delta) \left(\sqrt[4]{1,55} - 1 \right)$ $I_r = \frac{V}{\pi\Delta(D + 2\delta + \Delta)k_{sp}}$ $l = 2B_r \Delta I_r k_{sp} / (B_d b_m)$
15	Проверка толщины Δ , м	
16—20	См. табл. 2.32, п. 18—22	
21	Длина гистерезисного слоя I_r , м	
22	Длина магнита l , м	
23—28	См. табл. 2.32, п. 25—30	

Таблица 2.34. Порядок расчета муфты с радиальным намагничиванием по схеме 20 (см. рис. 2.30)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—12	См. табл. 2.30, п. 1—12	—
13	Диаметр D , м	$D \geqslant 30\delta p / [\pi(1 - \alpha)]$,
14	Диаметр вала d , м	$d = (0,2 \div 0,25) D$
15	Коэффициент рассеяния магнитного потока σ	$\sigma = 1,2 \div 1,3$
16	Диаметр магнита D_m , м	$D_m = \sqrt{[B_r \sigma V / (\pi \Delta) + 0,5d^2 B_d] 2 / B_d}$ $B_n = \frac{(D_m^2 - d^2) B_d}{(D - D_m) D_\alpha}$ $B_n = 1,2 \div 1,5$
17	Индукция в полюсе B_n , Т	

№ п. п.	Параметр	Формула
18	Толщина фланца когтебородной системы b_1 , м	$b_1 = 0,25B_d(D_m^2 - d^2)/(D_m B_a)$
19	Высота полюса h , м	$h = (D - D_m)/2$
20	Высота полюса h'_1 , м	$h'_1 = 0,2h$
21	Ширина полюса b , м	$b = \pi D \alpha / (2\rho)$
22	Проверка толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
23	Длина гистерезисного слоя l_r , м	$l_r = (D \Delta l_r) / (D \Delta)$
24	Толщина магнитопровода a_k , м	$a_k = \frac{\pi D}{4p} \alpha \frac{B_r}{B_a} k_{\text{зр}}$
25	Удельная н. с. в стали полюса H_p , А/м	Соответственно индукции B_p по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
26	Длина магнита l_m , м	$l_m = \frac{1}{H_d} \left[l_r H_p + 2 \Delta H_r + H_a \left(\pi \frac{D + 2\delta + 2\Lambda + a_k}{2p} + h + \frac{D_m - d}{2} \right) \right]$
27—29	См. табл. 2.30, п. 22—24	—

Таблица 2.35. Порядок расчета муфты с тангенциальным намагничиванием по схеме 20 (см. рис. 2.30)

№ п. п.	Параметр	Формула
1—5	См. табл. 2.30, п. 1—5	—
6—8	См. табл. 2.30, п. 8—10	—
9	Толщина гистерезисного слоя Δ , м	$\Delta = \left[\frac{30\delta p}{\pi(1-\alpha)} + 2\delta \right] \times \left(\sqrt[p]{1,55} - 1 \right) 0,5$
10	Диаметр D , м	$D \geq 2\Delta / \left(\sqrt[p]{1,55} - 1 \right)$
11	Коэффициент рассеяния магнитного потока σ	$\sigma = 1,2 \div 1,3$
12	Диаметр вала d , м	$d = (0,2 \div 0,25) D$

№ п.п.	Параметр	Формула
13	Диаметр магнита D_M , м	$D_M = \sqrt{\frac{4}{\pi B_d} \left[\frac{2pVB_r\sigma}{\pi(D+2\delta+\Delta)} + \right.}$ $\left. + \frac{\pi}{4} B_d d^2 \right]$
14	Индукция в полюсе B_p , Т	$B_p = \frac{(D_M^2 - d^2) B_d}{(D - D_M) D\alpha},$ $B_p = 1,2 \div 1,5$
15	Проверка толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
16	Длина гистерезисного слоя l_g , м	$l_g = \pi (D_M^2 - d^2) B_d / (8\Delta B_r k_{zp} \sigma_p)$
17	Индукция в стали B_a , Т	$B_a = 1,1 \div 1,4$
18	Толщина фланца когтебразной системы b_1 , м	$b_1 = 0,25 (D_M^2 - d^2) B_d / (D_M B_a)$
19	Высота полюса h , м	$h = (D - D_M)/2$
20	Высота полюса h' , м	$h' = 0,2h$
21	Ширина полюса b , м	$b = \alpha\pi D/(2p)$
22	Удельная н. с. в стали полюса H_p , А/м	Соответственно индукции B_p по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
23	Удельная н. с. в стали H_a , А/м	Соответственно индукции B_a по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
24	Длина магнита l_M , м	$l_M = [l_g H_p + 0,5 H_a (D_M - d + 2h) + H_r \pi (D + 2\delta + \Delta)/(2p) + 0,4\delta \pi (D_M^2 - d^2) B_d / (\sigma b l_g)] / H_a$
25—27	См. табл. 2.30, п. 22—24	—

Т а б л и ц а 2.36. Порядок расчета муфты с тангенциальным намагничиванием по схеме 21
(см. рис. 2.31)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—5 6	См. табл. 2.30, п. 1—5 Толщина экрана a , м	— По конструктивным соображениям

№ п.п.	Параметр	Формула
7	Конструктивные зазоры δ' , м	По конструктивным соображениям
8	Рабочий зазор δ , м	$\delta = 2\delta' + a$
9	Толщина гистерезисного слоя Δ , м	$\Delta = \left[\frac{30p\delta}{\pi(1-\alpha)} - 2\delta \right] \times 0,5 \left(1 - \sqrt[p]{0,66} \right)$
10	Диаметр D , м	$D \geq \frac{\Delta}{0,5 \left(1 - \sqrt[p]{0,66} \right)}$
11	Длина гистерезисного слоя l_r , м	$l_r = \frac{V}{\pi(D - \Delta) \Delta k_{3p}}$
12	Проверка толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
13	Ширина полюсного наконечника b , м	$b = \pi(D + 2\delta) \alpha / (2p)$
14	Высота полюсного наконечника h_p , м	$h_p = (0,05 \div 0,075)(D + 2\delta)$
15	Ширина магнита b_m , м	При $l = l_r$ $b_m = 2\Delta k_{3p} B_r / B_d$
16	Индукция в стали корпуса B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,4$
17	Толщина корпуса a_k , м	$a_k = b_m B_d / (2B_a)$
18	Индукция в полюсе B_p , Т	$B_p = b_m B_d / b$
19	Потери н. с. в стали, А/м:	Соответственно индукции по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
	полюса H_p	
	корпуса H_k	
20	Длина магнита l_m , м	$l_m = \left[\frac{\pi H_k}{2p} (D + 2\delta + 2h_p + a_k) + 2h_p H_p + 1,68 B_r 10^6 + H \cdot \frac{\pi(D - \Delta) + \Delta}{2p} \right] \times \frac{1}{H_d - \frac{\pi}{p} H_k}$
21	Размеры, м	$D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a; D_3 = D_2 + 2\delta'; D_4 = D_3 + 2h_p; D_5 = D_4 + 2l_m; D_6 = D_5 + 2a_k; D_7 = D - 2\Delta$
22—23	См.табл. 2.30, п. 23—24	—

Таблица 2.37. Порядок расчета муфты с радиальным намагничиванием по схеме 21 (см. рис. 2.31)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—5	См. табл. 2.30, п. 1—5	—
6—9	См. табл. 2.30, п. 7—10	—
10	Диаметр D , м	$D \geq \frac{30\delta p}{\pi(1-\alpha)} - 2\delta$
11	Длина гистерезисного слоя l_g , м	$l_g = \frac{V}{\pi(\nu + 2\delta)\alpha \Delta k_{sp}}$
12—14	См. табл. 2.36, п. 12—14	—
15	Ширина магнита b_m , м	При $l = l_g$ $b_m = bB_g/B_d$
16—18	См. табл. 2.36, п. 16—18	—
19	Потери н. с. в стали полюса H_p , А/м	Соответственно индукции B_g по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
20	Индукция в сердечнике B_c , Т	$B_c = bB_g/(D - 2\Delta)$
21	Потери н. с., А/м: в сердечнике H_c , в стали корпуса H_k	Соответственно индукции B_c по кривой намагничивания стали Соответственно индукции B_a по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
22	Длина магнита l_m , м	$l_m = [\pi H_k(D + 2\delta + 2h_p + a_k)/(2p) + 2h_p H_p + 1,68B_g 10^6 + 2\Delta H_g + (D - 2\Delta)H_c p^{-\rho_s}] \times \frac{1}{H_d - \pi H_k/p}$
23—25	См. табл. 2.36, п. 21—23	—

Таблица 2.38. Порядок расчета муфты с радиальным намагничиванием по схеме 22 (см. рис. 2.32)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—5	См. табл. 2.30, п. 1—5	—
6—9	См. табл. 2.30, п. 7—10	—
10	Диаметр D , м	$D \geq 30\delta / [\pi(1-\alpha)]$

№ п. п.	Параметр	Формула
11	Ширина полюса b , м	$b = 0,5\pi (D + 2\delta) \alpha$
12	Длина гистерезисного слоя l_{Γ} , м	$l_{\Gamma} = V/(b \Delta k_{\text{зп}})$
13	Проверка толщины экрана a , м	По методике (см. п. 3.7)
14	Индукция в стали полюса B_{Π} , Т	$B_{\Pi} = 1,2 \div 1,4$
15	Ширина полюса в основании b_{Π} , м	$b_{\Pi} = B_{\Gamma} b / B_{\Pi}$
16	Индукция в выступе полюсного наконечника $B_{\text{н}}$, Т	$B_{\text{н}} = 1,4 \div 1,5$
17	Высота полюсного наконечника h_{Π} , м	$h_{\Pi} = B_{\Gamma} (b - b_{\Pi}) k_{\text{сп}} / (2B_{\Pi})$
18	Диаметр D_4 , м	$D_4 = D + 12\delta + 2h_{\Pi}$
19	Коэффициент рассеяния магнитного потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
20	Сечение магнита S_M , м ²	$S_M = bl_{\Gamma}B_{\Pi}k_{\text{сп}}/(B_d\sigma) = b_M l$
21	Длина магнита l , м	$l \geq l_{\Gamma}$
22	Толщина магнита b_M , м	$b_M = S_M/l_{\Gamma}$ (при $l = l_{\Gamma}$)
23	Потери н. с. в стали полюса H_{Π} , А/м	Соответственно индукции B_{Π} по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
24	Индукция в стали сердечника ротора B_c , Т	$B_c = 1,2 \div 1,6$
25	Потери н. с. в стали сердечника H_c , А/м	Соответственно индукции B_c по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
26	Длина магнита в направлении намагничивания l_M , м	$l_M = \{(D - 2\Delta) H_c + 2\Delta H_{\Gamma} + 1,66B_{\Gamma}10^6 + H_{\Pi} [0,5\pi (D_4 + b_M) + (D_4 + b_M) - D - 2\delta]\} / (H_d + H_{\Pi})$
27	Толщина немагнитного корпуса a_K , м	По конструктивным соображениям
28	Размеры, м	$D_1 = D + 2\delta'; D_2 = D_1 + 2a; D_3 = D_2 + 2\delta'; D_5 = D_4 + 2b_M; D_6 = D_5 + 2a_K; D_7 = D - 2\Delta$
29—30	См. табл. 2.30, п. 23—24	—

Таблица 2.39. Порядок расчета муфты с тангенциальным намагничиванием по схеме 22 (см. рис. 2.32)

№ п.п.	Параметр	Формула
1—5	См. табл. 2.30, п. 1—5	—
6—8	См. табл. 2.30, п. 8—10	—
9	Толщина гистерезисного слоя Δ , м	$\Delta \leq 0,17 \left[\frac{30\delta}{\pi(1-\alpha)} - 2\delta \right]$
10	Диаметр D , м	$D \geq \Delta/0,17$
11	Ширина полюса b , м	$b = 0,5\pi(D + 2\delta)\alpha$
12	Длина гистерезисного слоя l_g , м	$l_g = V/[\pi(D - \Delta)k_{sp}]$
13—14	См. табл. 2.38, п. 13—14	—
15	Ширина полюса в основании b_n , м	$b_n = 2B_g\Delta/B_n$
16—19	См. табл. 2.38, п. 16—19	—
20	Сечение магнита S_m , м ²	$S_m = l_g \Delta B_g k_{sp} / (B_d \sigma) = b_m$
21—23	См. табл. 2.38, п. 21—23	—
24	Длина магнита в направлении намагничивания l_m , м	$l_m = \{0,5\pi(D - \Delta)H_g + 1,6\delta B_g 10^6 + \Delta H_g + H_n [0,5\pi(D_4 + b_m) + (D_4 + b_m) - D - 2\delta]\} / (H_d + H_n)$
25—28	См. табл. 2.38, п. 27—30	—

Таблица 2.40. Порядок расчета муфты по схеме 23 (см. рис. 2.33, а)

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Передаваемый момент M , Н·м	$M = 9,55Pk_m k_m/n$
2	Соотношение длины l_g и среднего диаметра гистерезисного слоя D_g , сп	$\lambda = l_g/D_g$, сп, $\lambda = 0,5 \div 2,5$
3	Толщина гистерезисного слоя Δ , м	По конструктивным соображениям
4	Индукция в гребне зубца B_z , Т	$B_z = 1,0 \div 1,5$
5	Величина коэффициента k_g	$k_g = \Delta/\tau = B_z k_{bz} / (2B_g k_{sp})$, где $k_{bz} = b_z/\tau = 0,35 \div 0,43$, $k_{sp} = 0,9 \div 1,0$
6	Зубцовое деление по гистерезисному слою τ_{sp} , м	$\tau_{sp} = \Delta/k_g$

№ п. п.	Параметр	Формула
7	Средний диаметр гистерезисного слоя $D_{\text{г.ср}}$, м	$D_{\text{г.ср}} = \sqrt[3]{\frac{2M}{\pi p_{\text{г}} k_{\text{г}} k_{\text{сп}} \lambda}}$
8	Длина гистерезисного слоя $l_{\text{г}}$, м	$l_{\text{г}} = D_{\text{г.ср}} \lambda$
9	Параметры зубцовой зоны: воздушный зазор δ' , м высота зубца h_z , м ширина гребня зубца b_z , м угол α , ...°	По конструктивным соображениям
10	Число зубцов индуктора z	$h_z = (7,5 \div 8,5) \delta'$ $b_z = k_{bz} \tau_{\text{ср}}$ $\alpha = 70 \div 80^\circ$ $z = \pi D_{\text{г.ср}} / \tau_{\text{ср}}$
11	Диаметр D_1 , м	$D_1 = D_{\text{г.ср}} - \Delta - 2\delta'$
12	Диаметр D_4 , м	$D_4 = D_{\text{г.ср}} + \Delta + 2\delta'$
13	Зубцовый шаг наружной зоны τ_2 , м	$\tau_2 = \pi D_4 / z$
14	Ширина гребня зубца b_{z2} , м	$b_{z2} = \tau_2 k_{bz}$
15	Зубцовый шаг внутренней зоны τ_1 , м	$\tau_1 = \pi D_1 / z$
16	Ширина гребня зубца b_{z1} , м	$b_{z1} = \tau_1 k_{bz}$
17	Поток в гистерезисном слое Φ , Вб	$\Phi = 2\pi D_{\text{г.ср}} l_{\text{г}} B_{\text{г}} k_{\text{г}} k_{\text{сп}}$
18	Коэффициент рассеяния магнитного потока σ	$\sigma = 1,1 \div 1,3$
19	Поток магнита $\Phi_{\text{м}}$, Вб	$\Phi_{\text{м}} = \Phi \sigma$
20	Диаметр вала d , м	По конструктивным соображениям или по методике (см. п. 3.9)
21	Сечение магнита $S_{\text{м}}$, м ²	$S = \Phi_{\text{м}} / B_d$
22	Диаметр магнита $D_{\text{м}}$, м	$D_{\text{м}} = \sqrt{(S_{\text{м}} + \pi d^2 / 4) / 4\pi}$
23	Проверка правильности выбора λ	$\lambda = l_{\text{г}} / (D_{\text{м}} + 2h_z + 2\delta' + \Delta)$
24	Индукция стали магнитопровода B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,4$
25	Толщина b , м	$b = \Phi_{\text{м}} / (\pi D_{\text{м}} B_a)$
26	Диаметр D_5 , м	$D_5 = D_{\text{м}} + 10(D_4 - D_1) > D_4 + 2h_z$
27	Диаметры, м	$D_2 = D_1 + 2\delta'; \quad D_3 = D_2 + 2\Delta;$ $D_6 = \sqrt{(\Phi / B_a + \pi D_5^2 / 4) / 4\pi}$

№ п. п.	Параметр	Формула
28	Поток через один зубец Φ_z , Вб	$\Phi_z = 2 \Delta l_r B_r k_{\text{сп}}$
29	Индукция над зубцом $B_{z\delta}$, Т	$B_{z\delta} = 2 \Delta B_r k_{\text{сп}} / b_z$
30	Потери н. с. в стали магнитопровода H_a , А/м	Соответственно индукции B_a по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
31	Потери н. с. в зубцах H_z , А/м	Соответственно индукции $B_{z\delta}$ по кривой намагничивания стали (см. п. 4.1)
32	Длина пути магнитного потока по средней линии магнитопровода l_a , м	$l_a = 0,5D_6 + 0,5D_5 - 0,5D_m - 0,5d + b + l_r + l_m - 2h_z - 2\delta' - \Delta$
33	Потери н. с. в стали магнитопровода F_a , А	$F_a = H_a l_a$
34	Потери н. с. в зубцах F_z , А	$F_z = H_z h_z$
35	Потери н. с. в воздушном зазоре F_δ , А	$F_\delta = 0,8\delta' B_{z\delta} 10^6$
36	Потери н. с. в гистерезисном слое F_r , А	$F_r = 0,5\tau H_r$
37	Длина магнита l_m , м	$l_m = [H_a(0,5D_6 + 0,5D_5 - 0,5D_m - 0,5d + b + l_r - 2h_z - 2\delta' - \Delta) + 2F_z + 2F_\delta + F_r] / (H_d - H_a)$

Таблица 2.41. Порядок расчета муфты по схеме 23
(см. рис. 2.33, б)

№ п. п.	Параметр	Формула
1—21	См. табл. 2.40, п. 1—21	—
22	Индукция в стали магнитопровода B_a , Т	$B_a = 1,2 \div 1,4$
23	Диаметр D_5 , м	$D_5 = \sqrt{(\Phi_m/B_a + \pi d^2/4) 4/\pi}$
24	Проверка правильности выбора λ	$\lambda = l_r/[D_5 + 2h_z + 2\delta' + \Delta + (0,5 \div 1) 10^{-3}]$
25	Диаметр D_m , м	$D_m = D_5 + 10(D_4 - D_1) \geq D_4 + 2h_z$
26	Толщина b , м	$b = \Phi_m / (\pi D_5 B_a)$
27	Диаметры, м	$D_2 = D_1 + 2\delta'; D_3 = D_2 + 2\Delta;$
28—37	См. табл. 2.40, п. 28—37	$D_6 = \sqrt{(S_m + \pi D_m^2/4) 4/\pi}$

ПРОВЕРКА РАСЧЕТА МАГНИТА С УЧЕТОМ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ СИСТЕМЫ

Правильность определения размеров магнита может быть проверена расчетом рабочей точки магнита с учетом магнитных проводимостей по всем участкам магнитной цепи. При этом ранее расчетом должны быть определены геометрические размеры магнитной системы механизма. Магнитную систему рассчитывают как электромагнитную цепь, намагниченную в собранном состоянии или с использованием магнитного шунта. Точность расчета зависит от правильности расчета

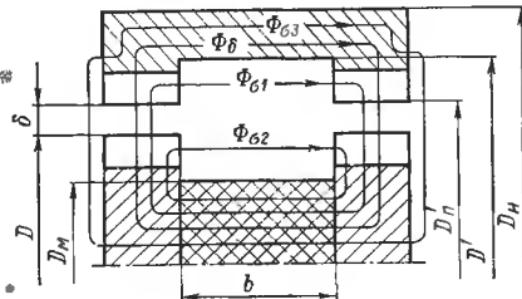


Рис. 2.34. Пример разбивки магнитной цепи на участки потоков рассеяния

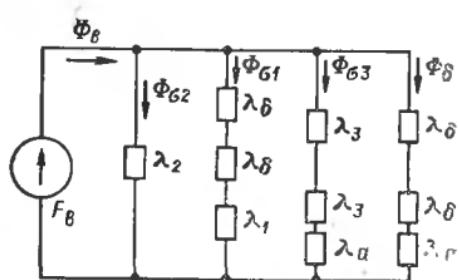


Рис. 2.35. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи муфты

магнитных проводимостей на пути потоков рассеяния и потоков магнита. При расчете проводимостей магнитную цепь разбивают на отдельные простейшие участки исходя из общей картины поля. При этом делается ряд упрощающих предположений:

- 1) поле в зазоре принимается плоским, без учета кривизны зазора;
- 2) изменение торцового рассеяния зубцовых элементов механизмов при сдвиге не происходит.

Магнитные проводимости межполюсных зазоров и проводимости на пути потоков рассеяния приведены в табл. 2.42 [2, 9, 10, 23]. Магнитная проводимость может быть рассчитана по формуле $\lambda = v\mu_0/l_{ср}^2$, где v — объем пространства; $l_{ср}$ — средняя длина силовой линии.

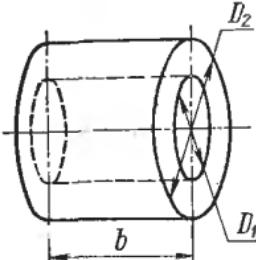
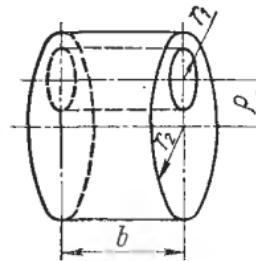
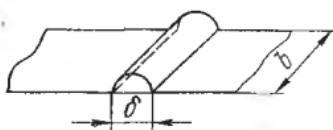
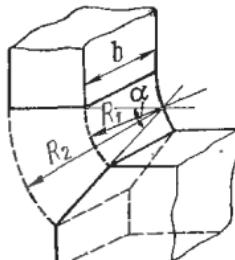
Пример разбивки магнитной цепи муфты на участки потоков рассеяния показан на рис. 2.34. Эквивалентная электрическая схема замещения магнитной цепи показана на рис. 2.35. Намагничающая сила возбуждения $F_B = \Sigma F$ расположена в плоскости сечения магнита, перпендикулярной оси вращения и симметричной относительно зубцовых элементов. Величины проводимостей определяются по формулам (обозначения размеров см. рис. 2.34).

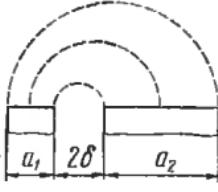
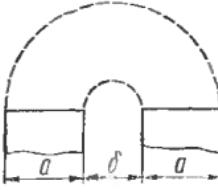
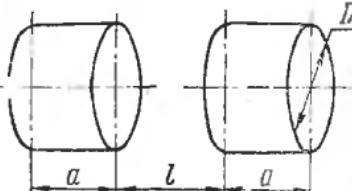
Проводимости (Bb/A) между выступающими частями зубцовых элементов наружной и внутренней полумуфты:

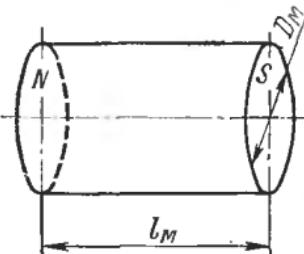
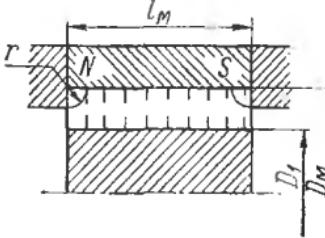
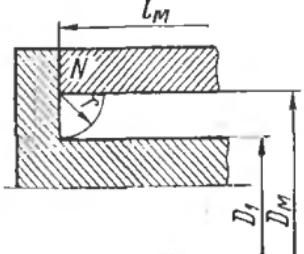
$$\lambda_1 = \pi\mu_0 [(D')^2 - (D_n')^2]/(4b);$$

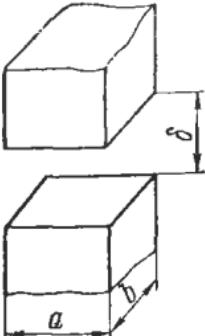
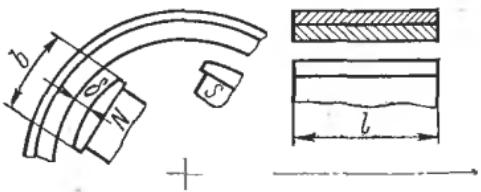
$$\lambda_2 = \pi\mu_0 (D^2 - D_M^2)/(4b).$$

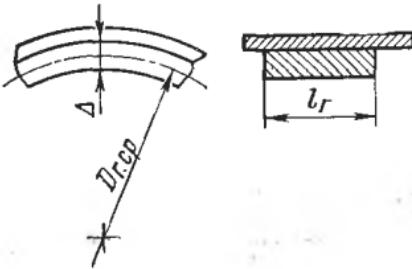
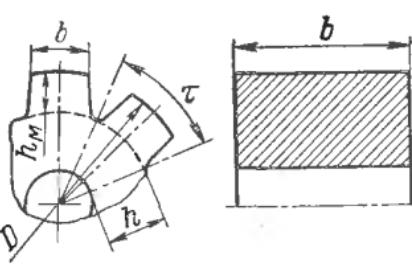
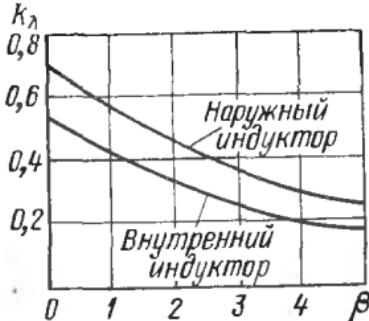
Таблица 2.42. Магнитные проводимости межполюсных зазоров и проводимости на пути потоков рассеяния

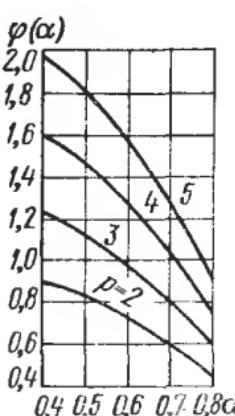
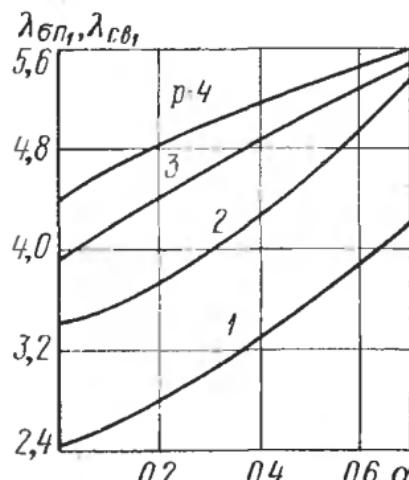
№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
1		Проводимость между коаксиальными цилиндрами $\lambda = 2\mu_0\pi b / \ln(D_2/D_1)$
2		Проводимость между некоаксиальными цилиндрами $\lambda = 2\pi b \mu_0 / \ln(n + \sqrt{n^2 - 1}),$ где $n = (r_1^2 + r_2^2 - b^2) / (2r_1 r_2)$
3		Проводимость полукруглого зазора, примыкающего к воздушному зазору, $\lambda = 0,26b\mu_0$. Для кольцевого зазора $\lambda = 0,26\pi D_{cp}\mu_0,$ где D_{cp} -- средний диаметр зазора
4		Проводимость между плоскостями, расположенными под углом α (рад) друг к другу, $\lambda = \frac{b}{\alpha} \ln \frac{R_2}{R_1} \mu_0$

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
5		<p>Проводимость между неравными по величине пластинами, расположенными в одной плоскости,</p> $\lambda = \frac{b}{\pi} \times \times \ln \left[\frac{\Delta}{(\delta - x)} - \frac{(\epsilon + x)^2}{\Delta (\delta - x)} - \frac{\epsilon + x}{\Delta} \right] \mu_0,$ <p>где b — длина зазора; $\epsilon = 0,5 (a_2 - a_1)$; $\Delta = 0,5 (a_1 + a_2) + \delta$; $x = (\Delta^2 - \delta^2 - \epsilon^2 - \sqrt{\Delta^2 - \delta^2 - \epsilon^2}) / (2\epsilon)$</p>
6		<p>Проводимость между равными по величине пластинами, расположенными в одной плоскости,</p> $\lambda = b \ln (1 + a/\delta) \mu_0 / \pi,$ <p>где b — длина зазора</p>
7		<p>Проводимость между цилиндрическими поверхностями соосных цилиндров</p> $\lambda = 2aD\mu_0 / (l + a)$

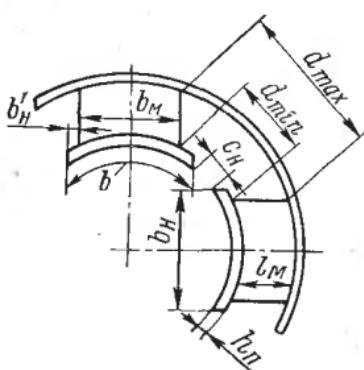
№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула																
8	 <p>Diagram of a magnetic core segment with length l_M and outer diameter D_M. The North pole (N) is on the left, and the South pole (S) is on the right.</p> <p>Graph showing the relationship between the factor k and the ratio l_M/D_M:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>l_M/D_M</th> <th>k</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,3</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>1,1</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>1,15</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>0,7</td><td>1,25</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>1,28</td></tr> <tr><td>0,9</td><td>1,3</td></tr> </tbody> </table>	l_M/D_M	k	0,3	1,0	0,4	1,1	0,5	1,15	0,6	1,2	0,7	1,25	0,8	1,28	0,9	1,3	<p>Проводимость рас- сения между торца- ми магнита по наруж- ной поверхности</p> $\lambda = D_M k \mu_0,$ <p>где k определяется по графику $k =$ $= f(l_M/D_M)$</p>
l_M/D_M	k																	
0,3	1,0																	
0,4	1,1																	
0,5	1,15																	
0,6	1,2																	
0,7	1,25																	
0,8	1,28																	
0,9	1,3																	
9	 <p>Diagram of a magnetic core segment with length l_M and outer diameter D_M. A cylindrical air gap of radius r is shown at the center. The North pole (N) is on the left, and the South pole (S) is on the right.</p>	<p>Проводимость ме- жду внутренней по- верхностью магнита и магнитопроводя- щим цилиндром вну- три магнита</p> $\lambda = \pi (l_M - 2r) \times \mu_0 / (\ln D_M / D_1),$ <p>где r — радиус тор- цового участка про- водимости</p>																
10	 <p>Diagram of a magnetic core segment with length l_M and outer diameter D_M. A slot of width $2r$ is shown on the left side. The North pole (N) is on the left, and the South pole (S) is on the right.</p>	<p>Проводимость тор- цового стыка магни- та и магнитопровода</p> $\lambda = 2 (D_M - 1,41r) \times r \mu_0 / l_M,$ <p>где l_M — длина маг- нита</p>																

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
11		<p>Проводимость между параллельными поверхностями</p> $\lambda = ab\mu_0/\delta = \mu_0 S/\delta,$ <p>где S — площадь поверхности</p>
12		<p>Проводимость воздушного радиального зазора гистерезисной муфты на один полюс</p> $\lambda_\delta = 0,4\pi d_i \tau / 10^{-6} / (\delta k_s),$ <p>где α_i — расчетный коэффициент полюсного перекрытия,</p> $\alpha_i = \alpha + \frac{4}{\tau/\delta + 6/(1-\alpha)};$ $\alpha = b/t;$ <p>k_s — коэффициент магнитной цепи, учитывающий падение магнитного потенциала в арматуре гистерезисного слоя при радиальном намагничивании; при тангенциальном намагничивании $k_s = 1$</p>

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула																		
13		<p>Проводимость гистерезисного слоя при радиальном намагничивании $\lambda_r = \mu_r \alpha_i \tau_{r, \text{ср}} l_r / \Delta$, где $\tau_{r, \text{ср}} = \pi D_{r, \text{ср}} / (2p)$; $D_{r, \text{ср}}$ — средний диаметр гистерезисного слоя; при тангенциальном намагничивании</p> $\lambda_r = 4\mu_r \times \frac{\Delta l_r p}{(1 - 0,5\alpha_i) \pi D_{r, \text{ср}}},$ <p>где $\mu_r = \mu_r \text{ max}$</p>																		
14	  <table border="1"> <caption>Data points estimated from Graph 14</caption> <thead> <tr> <th>β</th> <th>k_λ (Наружний индуктор)</th> <th>k_λ (Внутренний индуктор)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0.75</td> <td>0.55</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.65</td> <td>0.45</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.55</td> <td>0.35</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.45</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.35</td> <td>0.25</td> </tr> </tbody> </table>	β	k_λ (Наружний индуктор)	k_λ (Внутренний индуктор)	0	0.75	0.55	1	0.65	0.45	2	0.55	0.35	3	0.45	0.28	4	0.35	0.25	<p>Проводимость на пути потоков рассеяния магнита типа «звездочка»</p> $\lambda_\sigma = \lambda_3 k_\lambda.$ <p>Здесь λ_3 — магнитная проводимость потоков рассеяния в эквивалентном электромагните той же конфигурации, что и постоянный магнит,</p> $\lambda_3 = [1,6pl + 0,125D\varphi (\alpha)/p]10^{-6};$ <p>k_λ — коэффициент, учитывающий снижение проводимости в магните из-за магнитного сопротивления материала магнита;</p>
β	k_λ (Наружний индуктор)	k_λ (Внутренний индуктор)																		
0	0.75	0.55																		
1	0.65	0.45																		
2	0.55	0.35																		
3	0.45	0.28																		
4	0.35	0.25																		

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
	 <p>График магнитной проводимости $\lambda_{\text{сп}} = \lambda_{\sigma} + \lambda_{\text{оп}}$ для неявно полюсного магнита</p>	$k_{\lambda} = f\left(\sqrt{\frac{h_d \lambda_s}{\mu_d S_m}}\right) = f(\beta),$ <p>где μ_d — динамическая магнитная проницаемость в рабочей точке магнита,</p> $S_m = bl.$ <p>Значения $\varphi(\alpha)$ и $f(\beta)$ определяются по графикам</p> <p>Магнитная проводимость свободного состояния</p> $\lambda_{\text{сп}} = \lambda_{\sigma} + \lambda_{\text{оп}}$ <p>Магнитная проводимость на пути потоков из рабочих поверхностей полюсов</p> $\lambda_{\text{оп}} = l_{\text{оп}} 10^{-6},$ <p>где $\lambda_{\text{оп}}$ — проводимость на единицу осевой длины полюса. Определяется по графику $\lambda_{\text{оп}} = f(\alpha)$. Для неявно полюсного магнита проводимость свободного состояния</p> $\lambda_{\text{сп}} = \lambda_{\text{сп1}} l 10^{-6}$ <p>График совпадает с $\lambda_{\text{оп}}$</p>
	 <p>График магнитной проводимости $\lambda_{\text{сп}} = \lambda_{\sigma} + \lambda_{\text{оп}}$ для неявно полюсного магнита</p>	

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула																												
15	<p>Diagram illustrating the magnetic circuit segment. It shows two radial magnets with North (N) and South (S) poles. The air gap width is h_{Π}, the pole face width is b, and the pole tip radius is r. The distance from the center to the pole tip is D. Below the diagram is a graph plotting φ_3 and φ_4 versus $\alpha/(1-\alpha)$ and $(\alpha - \alpha_m)/(1-\alpha)$.</p> <p>Graph showing φ_3 and φ_4 versus $\alpha/(1-\alpha)$, $(\alpha - \alpha_m)/(1-\alpha)$</p> <table border="1"> <caption>Data points estimated from the graph</caption> <thead> <tr> <th>$\alpha/(1-\alpha)$</th> <th>$(\alpha - \alpha_m)/(1-\alpha)$</th> <th>$\varphi_3$</th> <th>$\varphi_4$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1.5</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.5</td> <td>2.5</td> <td>1.8</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1.0</td> <td>3.2</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1.5</td> <td>3.8</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2.0</td> <td>4.2</td> <td>3.5</td> </tr> </tbody> </table>	$\alpha/(1-\alpha)$	$(\alpha - \alpha_m)/(1-\alpha)$	φ_3	φ_4	0	0	0	0	1	0	1.5	1.0	2	0.5	2.5	1.8	3	1.0	3.2	2.5	4	1.5	3.8	3.0	5	2.0	4.2	3.5	<p>Проводимость на пути потоков рассеяния внутреннего индуктора с радиальными магнитами и полюсными наконечниками</p> $\lambda_{\sigma} = \lambda_s k_{\lambda} + \lambda_{\text{оп}}, \text{ где}$ $\lambda_s = [1,6pl + 0,125D_{\text{н.м}} \times \times \varphi(\alpha_m)/p] 10^{-6};$ <p>α_m — коэффициент полюсного перекрытия по наружному диаметру магнитов, $\varphi(\alpha_m)$ определяется по графику $\varphi(\alpha)$ в п. 14;</p> $k_{\lambda} = 0,54 - 0,11 \times$ $\times \left\{ \frac{1 - \alpha_m}{\alpha_m \mu d} \times \times \sin(0,5\pi/p) \right.$ $\times [0,64 + 0,05\varphi(\alpha_m) \times$ $\left. \times (1 - 2k_h)/(p\lambda)] \right\}^{0,45};$ <p>$k_h = h_{\Pi}/D, \lambda = l/D.$</p> <p>Здесь l — осевая длина магнита; $\lambda_{\text{оп}}$ — магнитная проводимость на пути магнитных потоков рассеяния полюсных наконечников,</p> $\lambda_{\text{оп}} = 3,2 [pk_h l / (1 - \alpha) + k_h D \varphi_3 + 0,5 \varphi_4] 10^{-6}.$
$\alpha/(1-\alpha)$	$(\alpha - \alpha_m)/(1-\alpha)$	φ_3	φ_4																											
0	0	0	0																											
1	0	1.5	1.0																											
2	0.5	2.5	1.8																											
3	1.0	3.2	2.5																											
4	1.5	3.8	3.0																											
5	2.0	4.2	3.5																											

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула														
	См. рисунок, п. 15	<p>Значения $\varphi_3 = f(\alpha)$ и $\varphi_4 = f(\alpha; \alpha_m)$ определяются по графикам соответственно $f(\alpha)$ и $f(\alpha; \alpha_m)$</p> <p>Магнитная проводимость свободного состояния</p> $\lambda_{cb} = \lambda_3 k_\lambda + \lambda_{\sigma H} + \lambda_{\sigma p}.$ <p>Определение магнитной проводимости на пути потоков из рабочих поверхностей полюсов $\lambda_{\sigma p}$ приведено в п. 14</p>														
16	 <p>16</p> <p>График зависимости φ_α от d_{min}/d_{max}:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>d_{min}/d_{max}</th> <th>φ_α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>5,0</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>4,0</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>3,5</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>3,0</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>2,5</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>2,0</td></tr> </tbody> </table>	d_{min}/d_{max}	φ_α	0,0	5,0	0,2	4,0	0,4	3,5	0,6	3,0	0,8	2,5	1,0	2,0	<p>Проводимость на пути магнитных потоков рассеяния наружного индуктора с радиальными магнитами и полюсными наконечниками</p> $\lambda_\sigma = \lambda_3 k_\lambda + \lambda_{\sigma H},$ <p>где</p> $\lambda_3 = (l_M \varphi_\alpha / d_{max} + l_M \varphi_\beta) 10^{-6};$ $\lambda_{\sigma H} = (5 h_n / c_n + 2 h_{pi} \varphi_{y1} + l \varphi_{y2}) 10^{-6};$ <p>значения k_λ определяются, как показано выше в п. 14, при $h_m = l_m$ для наружного индуктора. Значения функций $\varphi_\alpha = f(d_{min}/d_{max})$; $\varphi_\beta = f[b_m / (\tau - b_h)]$;</p>
d_{min}/d_{max}	φ_α															
0,0	5,0															
0,2	4,0															
0,4	3,5															
0,6	3,0															
0,8	2,5															
1,0	2,0															

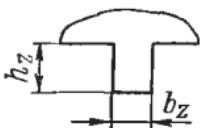
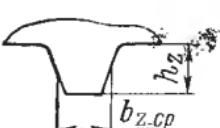
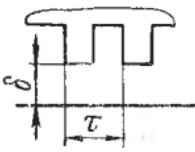
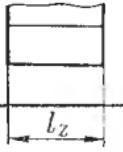
№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула																		
	<p>График зависимости магнитных потоков Φ_p и Φ_T от относительной ширины воздушного зазора $b_M/(l - b_M)$.</p> <table border="1"> <caption>Приблизительные значения из графика</caption> <thead> <tr> <th>$b_M/(l - b_M)$</th> <th>Φ_p</th> <th>Φ_T</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,0</td><td>0,0</td><td>0,0</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>1,5</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>3,0</td><td>2,5</td><td>1,8</td></tr> <tr><td>4,0</td><td>3,5</td><td>2,5</td></tr> <tr><td>5,0</td><td>4,0</td><td>3,0</td></tr> </tbody> </table>	$b_M/(l - b_M)$	Φ_p	Φ_T	1,0	0,0	0,0	2,0	1,5	1,0	3,0	2,5	1,8	4,0	3,5	2,5	5,0	4,0	3,0	<p>$\Phi_{\text{M1}} = f(b/c_h); \Phi_{\text{M2}} = f(2b_h/c_h)$ определяются по графикам. Магнитная проводимость свободного состояния</p> $\lambda_{\text{cb}} = \lambda_3 k_\lambda + \lambda_{\sigma h} + \lambda_{\sigma p}$
$b_M/(l - b_M)$	Φ_p	Φ_T																		
1,0	0,0	0,0																		
2,0	1,5	1,0																		
3,0	2,5	1,8																		
4,0	3,5	2,5																		
5,0	4,0	3,0																		
17	<p>Схемы участка магнитной цепи для расчета проводимости на пути рассеяния.</p>	<p>Проводимость на пути магнитных потоков рассеяния наружного индуктора со скобообразными магнитами</p> $\lambda_\sigma = \lambda_3 k_\lambda + \lambda_{\sigma a}.$ <p>Здесь</p> $\lambda_3 = \lambda_{\text{sh}} l + \lambda_{\text{ev}} (l - l_g) + \lambda_{\text{et}} b_M + \lambda_{\text{em}} l_g;$ $\lambda_{\sigma a} = \lambda_{\text{ah}} l + \lambda_{\text{av}} \times (l - l_g) + (\lambda_{\text{am}} + \lambda_{\text{an}}) l_g + \lambda_{\text{apt}} b_M + \lambda_{\text{ant}} h,$ <p>где λ_{sh} — удельная магнитная проводимость на пути потоков рассеяния наружной поверхности магнитов; λ_{ev} — то же, внутренней цилиндрической поверхности лобовых вылетов магнитов,</p>																		

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
		$\lambda_{\text{ЭН}} = \lambda_{\text{ЭВ}} = \frac{0,8}{\gamma} \times$ $\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\gamma}{k^2} \times$ $\times (1 - \cos k\gamma),$ <p>при $k = 1, 3, 5, \dots$, $\gamma = 0,5\pi l_m/D_{\text{ср. м}}$, где l_m — длина магнита в направлении намагничивания, $D_{\text{ср. м}}$ — средний диаметр магнита; $\lambda_{\text{ЭМ}}$ — удельная магнитная проводимость на пути потоков рассеяния внутренней цилиндрической поверхности магнитов в областях межполюсного пространства; $\lambda_{\text{дм}}$ — то же лобовых вылетов стальных полюсов; при замкнутом на гистерезисный слой индукторе</p> $\lambda_{\text{ЭМ}} = \frac{20}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \times$ $\times \frac{d^{\pi k/\gamma}}{d^{2\pi k/\gamma} - 1} \times$ $\times \cos \frac{\pi k \beta}{\gamma} + \frac{0,4}{\pi} \times$ $\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \times$ $\times \frac{d^{\pi k/\gamma} - 1}{d^{\pi k/\gamma} + 1} \times$

См. рисунок, п. 17

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
	См. рисунок, п. 17	$\times \cos \frac{\pi k \beta}{\gamma} + \frac{2,5}{\gamma} \ln d,$ <p>где $d = D_4 / (D_3 + 2h_n)$;</p> $\lambda_{am} = 0$ <p>при свободном состоянии индуктора:</p> $\lambda_{em} =$ $= \frac{20}{\pi^2} \frac{\gamma}{\beta} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \times$ $\times \frac{d^{\pi k / \gamma}}{d^{2\pi k / \gamma} - 1} \times$ $\times \sin \frac{\pi k \beta}{\gamma};$ $\lambda_{am} =$ $= \frac{0,4\gamma}{\pi\beta} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \times$ $\times \frac{d^{\pi k / \gamma} - 1}{d^{\pi k / \gamma} + 1} \times$ $\times \sin \frac{\pi k \beta}{\gamma} +$ $+ \frac{2,5}{\gamma} \ln d;$ <p>λ_{et} — удельная магнитная проводимость на пути потоков рассеяния торцовых поверхностей магнита, $\lambda_{et} = 1,6 + 0,09\gamma^2 + 0,0062\gamma^5$; λ_{an} — то же наружной поверхности стальных полюсов; λ_{av} — то же внутренней поверхности стальных полюсов;</p>

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
	См. рисунок, п. 17	$\lambda_{\text{ан}} = \lambda_{\text{ав}} =$ $= \frac{0,8}{\gamma} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\gamma}{k^2} \times$ $\times [\cos k\gamma - (-1)^k];$ <p>$\lambda_{\text{апт}}$ — то же цилиндрической поверхности стальных полюсов в области межполюсного пространства,</p> $\lambda_{\text{ант}} = 5 \times$ $\times \left[\frac{0,5\pi - \gamma}{\pi \sin [0,5 \times]} + \right.$ $\times (0,5\pi - \alpha)]$ $+ 0,26 \Bigg];$ <p>$\lambda_{\text{ант}}$ — то же боковых поверхностей полюсных наконечников и торцевых поверхностей стальных полюсов,</p> $\lambda_{\text{ант}} = 5 \left(\frac{1}{\pi} \times \right.$ $\times \ln \frac{\tan 0,5\gamma}{\tan 0,5\beta} \left. + 0,26 \right),$ <p>где $\beta = 0,5\pi (1 - \alpha)$ Определение величины k_λ см. п. 14</p>

№ п.п.	Схема участка магнитной цепи	Характеристика и формула
19	 	Проводимость зубца: прямоугольного $\lambda_z = B_z b_z l / (H_z h_z)$ трапецидального $\lambda_z = B_z b_{z\text{cp}} l / (H_z h_z)$
20	 	Проводимость пазового рассеяния $\lambda_{z0} = 0,32 l_z \mu_0 \times \ln(0,5\tau/\delta)$

Проводимость между торцовыми поверхностями полумуфт:
при $D_h - D'_n < D$

$$\lambda_3 \approx (D + \delta) \left[10^{-6} + \mu_0 \ln \left(3 + \frac{D_h - D}{\delta} \right) \right];$$

при $D_h - D'_n \geq D$

$$\lambda_3 \approx (D + \delta) [10^{-6} + \mu_0 \ln (1 + D/\delta)].$$

Проводимость зубцового зазора

$$\lambda_\delta = \mu_0 l_z \pi D_{\text{cp}} \psi (\delta/\tau; x_0/\tau; \alpha_z)/\tau.$$

Проводимость стали

$$\lambda_a = B_a S_a / (H_a l_a).$$

Удельные проводимости зубцовых зон показаны на рис. 2.36.
Соответственно, магнитные потоки имеют величину:

$$\Phi_{\sigma_1} = F_B \lambda_1 \lambda_\delta / (\lambda_\delta + 2\lambda_1); \quad \Phi_{\sigma_2} = F_B \lambda_2;$$

$$\Phi_{\sigma_3} = F_B \lambda_3 \lambda_a / (\lambda_3 + 2\lambda_a); \quad \Phi_\delta = F_B \lambda_\delta \lambda_a / (\lambda_\delta + 2\lambda_a).$$

Таким образом,

$$\Phi_B = \Phi_\delta + \Phi_\sigma = \Phi_\delta \sigma,$$

отсюда

$$\sigma = 1 + \Phi_\sigma / \Phi_\delta = \Phi_B / \Phi_\delta.$$

Зная величины магнитных потоков, можно проверить правильность определения сечения магнитопровода. Система намагничивается в сборе.

Рассмотрим диаграмму магнита (рис. 2.37). Линия OA характеризует проводимость магнитной цепи муфты λ_g при рассогласованном положении зубцов. Линия OC — проводимость λ_d при согласованном положении зубцов. Проводимости λ_d и λ_g можно представить в виде сумм постоянных (проводимости магнитопровода и магнита λ_m) и переменных составляющих (проводимости зубцовых элементов λ_b):

$$\lambda_d = \lambda_m + \lambda_{cb}; \quad \lambda_g = \lambda_m + \lambda_{pb}.$$

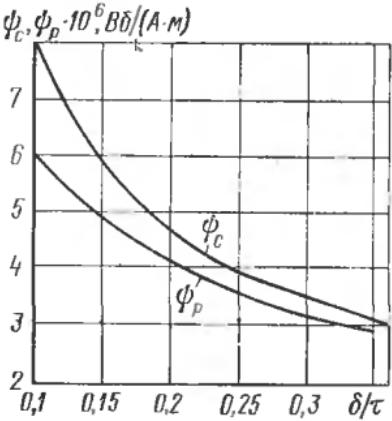
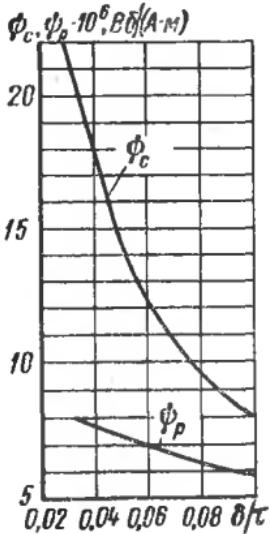


Рис. 2.36. Удельные проводимости зубцовых элементов:
 ϕ_c — проводимость при согласованном положении зубцов,
 ϕ_p — проводимость при рассогласованном положении зубцов

Ψ_c — проводимость при согласованном положении зубцов, Ψ_p — проводимость при рассогласованном положении зубцов

Проводимость $\lambda_m = \lambda_{sm} + k_p \lambda_{sp}$, где λ_{sm} — суммарная проводимость рассеяния магнитопровода при отсутствии падения магнитного потенциала вдоль магнитопровода; $k_p \lambda_{sp}$ — расчетная проводимость рассеяния постоянного магнита; k_p — коэффициент уменьшения проводимости рассеяния магнита вследствие изменения разности магнитных потенциалов вдоль магнита. Практически $k_p = 0,5 \div 0,75$. Величина λ_{sp} определяется геометрическими размерами и формой магнита.

Угол наклона OC или OA определяется по формуле $\alpha_m = \arctg(\lambda_m / S_m)$. Линия AEB — линия возврата. Линия возврата проводится под углом $\beta_m = \arctg \rho$ к горизонтали, где ρ — коэффициент возврата. Коэффициент возврата равен магнитной проницаемости в частном цикле $\rho = \mu_\Delta = \Delta B / (\Delta H)$ и зависит от материала магнита и индукции в нем.

На диаграмме площадь AOE пропорциональна изменению энергии магнита муфты при сдвиге зубцов полумуфты на пространственный угол $\alpha = \pi/2$. Положение точки E определяет рабочие значения H и B магнита.

В магнитно-гистерезисных системах магнитная цепь характеризуется проводимостями воздушного зазора λ_b , гистерезисного слоя λ_r ,

полезной проводимостью воздушного зазора и гистерезисного слоя $\lambda_{\delta r}$, магнитной проводимостью путей рассеяния магнита и магнитно-мягкой арматуры λ_σ и проводимостью свободного состояния магнита и арматуры $\lambda_{\text{св}}$ (при сборке без магнитных шунтов), $\lambda_{\delta r} = \lambda_\delta \lambda_r / (\lambda_\delta + \lambda_r)$. Значения λ_σ в зависимости от вида индуктора определены в табл. 2.42.

Проверка расчета сводится к определению действительного значения индукции в гистерезисном слое B_r , которое предварительно (при расчете) принимается оптимальным или соответствующего значения индукции в зазоре B_δ . Если реальная индукция в гистерезисном слое $B_{r, \text{р}} \neq B_{r, \text{опт}}$, то реальный момент

$$M_{r, \text{р}} = M_{r, \text{опт}} (B_{r, \text{р}} / B_{r, \text{опт}})^2.$$

При радиальном воздушном зазоре и радиальном намагничивании

$$B_r = B_\delta \frac{Dl}{(D \pm \delta' \pm \Delta) l_r k_{3, \text{п}}},$$

при тангенциальном намагничивании

$$B_r = B_\delta \frac{\pi D a l}{4 p \Delta l_r k_{3, \text{п}}}.$$

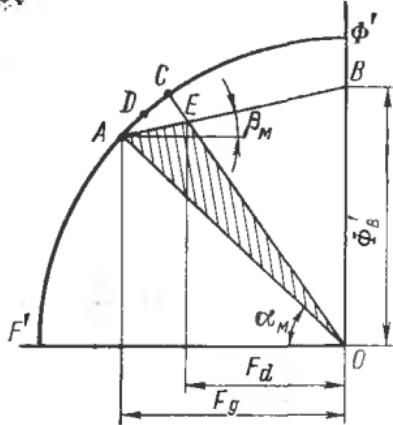


Рис. 2.37. Диаграмма магнита

При сборке с магнитными шунтами или намагничивании в сборе. Для индуктора без полюсных наконечников (магнит «звездочка»)

$$B_\delta = B_r \left\{ \frac{B_s^* (1 + \lambda_\sigma^* + \lambda_{\sigma r}^*) \lambda_{\sigma r}^*}{2 (\lambda_\sigma^* + \lambda_{\sigma r}^*)} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 (\lambda_{\sigma r}^* + \lambda_\sigma^*)}{B_s^* (1 + \lambda_{\sigma r}^* + \lambda_\sigma^*)^2}} \right] \right\} = B_r A (\gamma; \lambda^*).$$

Здесь B_r — остаточная индукция; B_s^* — относительное значение индукции насыщения, $B_s^* = B_s / B_r = \gamma / (2\sqrt{\gamma - 1})$, где γ — коэффициент формы кривой размагничивания; λ^* — относительные значения проводимостей, $\lambda^* = \lambda / \lambda_r$, где λ_r — масштабная магнитная проводимость, $\lambda_r = B_r S_m / (H_c l_m) = \mu_r S_m / l_m$.

Для индуктора с радиальными магнитами и полюсными наконечниками

$$B_\delta = B_r \frac{S_m}{\alpha t} A (\gamma; \lambda^*).$$

Для внешнего индуктора со скобообразными магнитами S_m — сумма сечения двух магнитов.

Для когтеобразного индуктора с цилиндрическим магнитом

$$B_\delta = B_r \frac{S_m}{\rho \alpha l} A(\gamma; \lambda^*),$$

где S_m — торцовое сечение магнита.

Для индуктора с зубцовыми зонами

$$B_\delta = B_r \frac{S_m}{b_2 l z} A(\gamma; \lambda^*),$$

где S_m — торцовое сечение магнита.

При сборке без магнитных шуитов. Для индуктора «звездочка»

$$\begin{aligned} B_\delta = B_r & \left[\frac{B_s^{*,1}}{2} \left(1 + \frac{1}{\lambda_{cb}^*} \right) - \right. \\ & \left. - \sqrt{\frac{(B_s^*)^2}{4} \left(1 + \frac{1}{\lambda_{cb}^*} \right) - \frac{B_s}{\lambda_{cb}^*}} \right] \frac{(\lambda_{cb}^* + \mu_b^*) \lambda_{\delta r}^*}{\lambda_{cb}^* + \lambda_\sigma^* + \mu_b^*} = \\ & = B_r A_1(\gamma; \lambda^*), \end{aligned}$$

где μ_b^* — относительный коэффициент возврата магнита.

Для индукторов с полюсными наконечниками

$$B_\delta = B_r \frac{S_m}{\alpha t l} A_1(\gamma; \lambda^*).$$

2.9

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СММ

В электромагнитных механизмах регулировкой тока возбуждения можно изменять величину передаваемого момента. Рассмотрим особенности расчета электромагнитного механизма на примере муфты вращения. Возможны три варианта расчета:

1. Произведение главных размеров $D^2 l$ определяют по рабочему моменту. Пусковой момент создается при пусковой форсировке возбуждения. При этом кратность пускового момента $k_m = 1$, коэффициент форсирования возбуждения $k_b = U_{b,n}/U_{b,p} > 1$, где $U_{b,p}$ — напряжение возбуждения при пуске; $U_{b,n}$ — номинальное напряжение возбуждения. При этом следует учитывать характер момента сопротивления исполнительного механизма в переходных режимах.

2. Произведение главных размеров $D^2 l$ определяется по пусковому моменту. Возбуждение не форсируется и после пуска должно быть снижено до величины, достаточной для передачи рабочего момента. При этом уменьшаются потери в экране и растет к. п. д. В этом случае $k_m > 1$, $k_b = 1$.

3. Произведение главных размеров $D^2 l$ определяется по пусковому моменту. Возбуждение не форсируется и после пуска остается постоянным. При этом $k_m > 1$, $k_b = 1$.

Система, рассмотренная в п. 1, имеет наименьшую массу и габариты, однако в ней нет резервов увеличения передаваемого момента, так как форсировка возбуждения связана с большими потерями в экране и понижением к. п. д. Система, приведенная в п. 2, наиболее практична, имеет запас по моменту, но по габаритам больше первой. Использование 1-го и 2-го вариантов требует оснащения привода пусковой автоматикой. В 3-м варианте пусковая автоматика не нужна; вариант применим в системах с высоким к. п. д.

Из всех СММ наибольшее распространение получили бесконтактные механизмы реактивного типа. Это объясняется тем, что при расположении обмоток возбуждения в подвижных элементах токоподвод к ним осуществляется через контактные кольца, снижающие надежность привода; на обмотки действуют также центробежные силы. Наибольшее применение нашли расчетные схемы с неподвижной обмоткой возбуждения (см. табл. 1.1): для муфт — 10, 11, 12; для механизма поступательного перемещения — 22, для редукторов — 19, 26. При размещении обмотки возбуждения во врачающихся или поступательно-движущихся частях механизма возможно использование расчетных схем магнитных механизмов.

Расчет электромагнитных механизмов в целом повторяет расчет магнитных систем аналогичной конструктивной схемы. При этом вместо определения размеров постоянного магнита рассчитывают обмотку возбуждения и сечение магнитопровода, замыкающего магнитную систему. При расчете магнит заменяется стальным участком магнитной цепи с сечением (м^2)

$$S_a = \Phi_m / B_a,$$

где Φ_m — поток через магнитопровод, Вб; B_a — индукция в стали, Т.

Определив все размеры системы с учетом размещения катушки (задаются диаметральные размеры), производят расчет обмотки возбуждения в первом приближении, учитывая только потери н. с. в воздушном зазоре. Затем корректируют размеры системы с учетом рассчитанной катушки возбуждения и методом последовательного приближения производят окончательный расчет обмотки и определение аксиальных размеров механизма. При расчете обмотки возбуждения и определении размеров катушки по эскизу механизма определяется длина среднего витка обмотки возбуждения [5, 25]

$$l_{\Theta} = \pi D_{k.c.p.},$$

где $D_{k.c.p.}$ — средний диаметр катушки возбуждения.

Сечение (мм^2) проводника обмотки из меди определяется выражением

$$g = -\frac{\sum F l_{\Theta} k_t}{57 U_B} k_B,$$

где U_B — напряжение на обмотке возбуждения; k_t — температурный коэффициент увеличения сопротивления обмотки; k_B — коэффициент форсирования возбуждения. Здесь $k_t = 1 + 0,004 \theta$, где θ — перегрев

обмотки выше 20°C . Значения k_t в зависимости от температуры следующие:

$\theta, ^{\circ}\text{C} \dots \dots \dots$	55	60	65	70	75	80	85
$k_t \dots \dots \dots$	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,33
$\theta, ^{\circ}\text{C} \dots \dots \dots$	90	95	100	105	110	115	120
$k_t \dots \dots \dots$	1,36	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,48

Расчетная температура нагрева обмотки для классов изоляции A , E , B — 75°C , F и H — 115°C . В специальных механизмах допустимо повышение расчетных температур.

Значение g корректируется в соответствии с ГОСТом на сечения проводов. Принимается ближайшее стандартное значение. При $g < 2 \text{ mm}^2$ следует использовать круглые обмоточные провода. При $g > 2 \text{ mm}^2$ рекомендуется использовать прямоугольные провода. Затем производится в соответствии с условиями работы выбор марки провода. Для механизмов транспортных устройств используют провода марок ПЭТ, ПЭТ-2, ПЭТВ, ПЭВ-2, ПЭТВП, ПЭТКСОТ, ПЭТКСО, ПСДКТ, для общего применения — ПЭЛ, ПЭВ-2, ПЭТСО, ПСД, ПДА, ПСДК и др. При этом провода ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ-2 используют преимущественно при напряжении до 30 В.

Ток в обмотке возбуждения

$$I_{\text{в}} = ig,$$

где i — плотность тока, определяемая в зависимости от класса изоляции обмотки и температурных условий работы. Для вращающихся обмоток допускается плотность тока при длительном режиме и интенсивном охлаждении продувкой воздуха $14\text{--}16 \text{ A/mm}^2$, самовентиляции — $6\text{--}12 \text{ A/mm}^2$, естественном охлаждении — $2\text{--}4 \text{ A/mm}^2$. Для неподвижных обмоток, расположенных в корпусе, при продувке охлаждающего воздуха допускается плотность тока $6\text{--}8 \text{ A/mm}^2$, самовентиляции — $5\text{--}7 \text{ A/mm}^2$, естественном охлаждении — $3\text{--}5 \text{ A/mm}^2$, при водяном охлаждении корпуса — $10\text{--}12 \text{ A/mm}^2$. При кратковременной работе механизма значения плотности тока могут быть увеличены на 25%.

Число витков обмотки возбуждения

$$w = \sum F / I_{\text{в}}.$$

Окно, занятое обмоткой возбуждения, должно иметь площадь

$$S_{\text{в}} = g_{\text{из}} w / k_{3,0},$$

где $g_{\text{из}}$ — площадь сечения изолированного проводника; $k_{3,0}$ — коэффициент заполнения окна, $k_{3,0} = 0,72 \div 0,81$.

Площадь окна может быть также задана размерами катушки возбуждения $S_{\text{в}} = l_{\text{k}} h_{\text{k}}$, где l_{k} и h_{k} — длина и толщина поперечного сечения катушки. Из условий минимальной массы магнитопровода при постоянстве величин D_{k} , ср , ΣF , g и $S_{\text{в}}$ рекомендуется принять $l_{\text{k}}/h_{\text{k}} = 1,5 \div 3 = k_{\text{k}}$. Таким образом, следует определить размеры h_{k} и l_{k} по заданному отношению k_{k} :

$$h_{\text{k}} = \sqrt{S_{\text{в}}/k_{\text{k}}}; \quad l_{\text{k}} = h_{\text{k}} k_{\text{k}}.$$

Зная h_k и приняв коэффициент плотности намотки k_n , можно определить число слоев $n_{\text{сл}} = h_k k_n / d_{\text{из}}$, а затем число витков в слое $w_{\text{сл}} = l_k k_n / d_{\text{из}}$. Здесь $k_n = 0,85 \div 0,9$.

Полная длина (м) провода обмотки

$$L_p = l_{\omega} w.$$

Сопротивление (Ом) обмотки в холодном состоянии (при 20° С) $R_0 = L_p / 57g$.

Сопротивление (Ом) обмотки при рабочей температуре $R_{0H} = k_t R_0$. Масса (кг) меди обмотки $M_0 = 8,9 L_p g 10^{-3}$.

В табл. 2.43 приведен порядок расчета обмотки возбуждения при следующих заданных параметрах: режим работы; способ охлаждения; напряжение возбуждения U_B , В; коэффициент форсирования напряжения возбуждения k_B , $k_B = 1,5 \div 2$; класс изоляции обмотки; рабочая температура обмотки θ_p , °С.

Закончив расчет обмотки возбуждения, следует проверить действительную температуру обмотки по методике, приведенной в п. 3.1. В случае расположения обмотки возбуждения на врачающейся части механизма необходимо также рассчитать контактные кольца, через которые питается обмотка возбуждения. Предварительно выбирают марку щеток. Для контактных колец используют щетки марок М1, М3, М20, МГ, МГ2, МГ4, МГ64, МГСБ и др. По плотности тока определяют размеры щеток, ширину контактного кольца и его диаметр. Окружная скорость кольца не должна превышать допустимую для щеток.

Зная величину тока возбуждения I_B и плотность тока в щетке $i_{\text{щ}}$, определяют сечение щеток $S_{\text{щ}} = l_{\text{в}} / i_{\text{щ}}$. Затем выбирают ближайшие большие стандартные размеры щетки $b_{\text{щ}}$ и $l_{\text{щ}}$. При этом $S_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} l_{\text{щ}}$.

Ширина контактных колец берется на 0,5—1 мм больше ширины щетки. Диаметр колец

$$D_k \geqslant 60 v_{\text{щ}} / (\pi n),$$

где $v_{\text{щ}}$ — допустимая окружная скорость щетки.

Контактные кольца выполняют из твердой меди марки М-1, бронзы или стали. Конструктивно кольца устанавливают на вал СММ с помощью изоляционного основания из текстолита или гетинакса, к которому их крепят с помощью клея или осевых изолированных болтов (или шпилек).

При проверке правильности расчета магнитной цепи электромагнитного механизма необходимо учитывать потоки, проходящие через обмотку возбуждения. Так, например, схема магнитной цепи однополюсной цилиндрической электромагнитной муфты с неподвижной обмоткой возбуждения и потоком рассеяния показаны на рис. 2.38. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи показана на рис. 2.39.

Величины проводимостей определяются формулами, приведенными выше. Проводимость ($\text{Вб}/\text{А}$) между поверхностями неподвижного магнитопровода в зоне обмотки возбуждения (для потока Φ_{σ_1}) [6]:

$$\lambda_1 = \frac{D_{\text{вн}}^2}{b} k_{\phi} (\xi) 10^{-6};$$

$$\lambda_2 = \frac{\pi \mu_0}{4b} (D_{\text{вн}}^2 - D_p^2) \approx \frac{D_{\text{вн}}^2 10^{-6}}{b} (\xi^2 - x^2).$$

Проводимость между торцовыми поверхностями:
 при $D_{\text{н}} - D'_{\text{п}} < D$ $\lambda_3 \approx (D + \delta) \{10^{-6} + \mu_0 \ln [3 + (D_{\text{н}} - D_{\text{п}})/\delta]\}$;
 при $D_{\text{н}} - D'_{\text{п}} \geq D$ $\lambda_3 \approx (D + \delta) [10^{-6} + \mu_0 \ln (1 + D/\delta)]$.

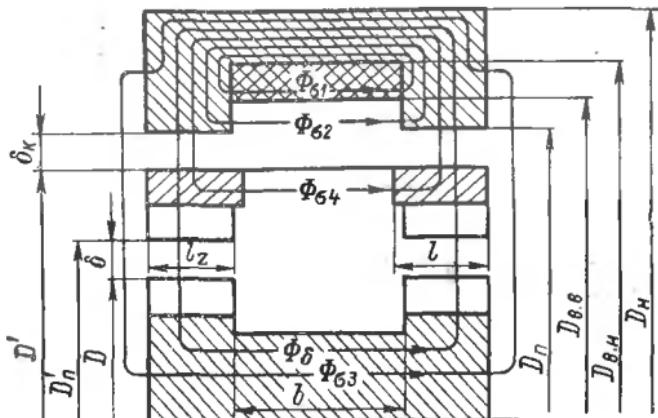


Рис. 2.38. Схема магнитной цепи и потоки рассеяния электромагнитной муфты с неподвижной обмоткой

Проводимость между поверхностями неподвижного магнитопровода и наружной полумуфты в конструктивном зазоре

$$\lambda_{\delta K} = \frac{8 \cdot 10^{-6} l}{\ln (1 + 2\delta_K/D')}.$$

Так как $\delta_K \ll D'$, то $\lambda_{\delta K} = 4 \cdot 10^{-6} D' l / \delta_K$.

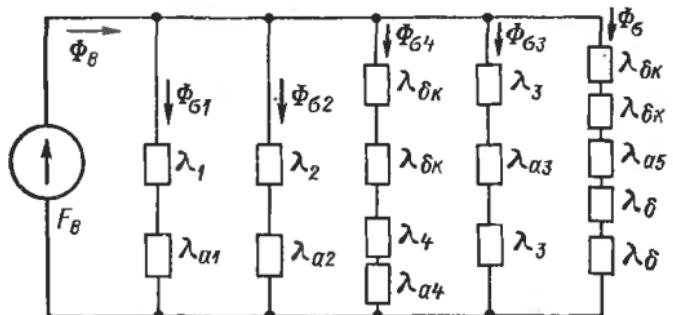


Рис. 2.39. Эквивалентная схема магнитной цепи электромагнитной муфты

Проводимость между торцовыми поверхностями зубцовых зон наружной полумуфты

$$\lambda_4 = [(D')^2 - (D'_{\text{п}})^2] \pi \mu_0 / (4b).$$

Проводимость рабочего зазора

$$\lambda_{\delta} = \mu_0 l_z \frac{\pi D_{\text{ср}}}{\tau} \psi \left(\frac{\delta}{\tau}; \frac{x_0}{\tau}; \alpha_z \right).$$

Таблица 2.43. Порядок расчета обмотки возбуждения электромагнитного СММ

№ п.п.	Параметр	Формула
1	Диаметр среднего витка обмотки возбуждения $D_{к.ср}$, м	По эскизу СММ
2	Длина среднего витка l_{ω} , м	$l_{\omega} = \pi D_{к.ср}$
3	Коэффициент теплового увеличения сопротивления обмотки	$k_t = 1,1 \div 1,3$
4	Сечение проводника по меди g , мм^2	$g = \frac{\sum F l_{\omega} k_t k_B}{57 U_B},$ где $\sum F$ определяется расчетом магнитной цепи СММ; при первом приближении $\sum F$ определяется только по воздушным рабочему и конструктивному зазорам; при окончательном расчете учитываются падения н. с. в стали магнитной системы В зависимости от способа охлаждения (см. выше)
5	Плотность тока i , $\text{А}/\text{мм}^2$	$I_B = ig$
6	Ток возбуждения I_B , А	$w = \sum F / I_B$
7	Число витков обмотки возбуждения w	См. п. 5.12 и 5.13
8	Марка провода, сечение g , мм^2	Там же
9	Сечение провода в изоляции $g_{из}$, мм^2	»
10	Диаметр провода в изоляции $d_{из}$, мм	По эскизу СММ
11	Толщина катушки h_k , мм	$k_h = 0,85 \div 0,9$
12	Коэффициент плотности намотки k_h	$n_{сл} = h_k k_h / d_{из}$
13	Число слоев $n_{сл}$	$w_{сл} = w / n_{сл}$
14	Число витков в слое $w_{сл}$	$l_k = w_{сл} d_{из} / k_h$
15	Длина катушки l_k , мм	$l_k / h_k = 1,5 \div 3$
16	Длина провода обмотки $L_{п}$, м	$L_p = l_{\omega} w$
17	Сопротивление обмотки при 20°C R_0 , Ом	$R_0 = L_p / 57 g$
18	Сопротивление обмотки при рабочей температуре $R_{0..н}$, Ом	$R_{0..н} = k_t R_0$
19	Масса меди M_0 , кг	$M_0 = 8,9 L_p g 10^{-3}$

Магнитная проводимость стали

$$\lambda_a = B_a S_a / (H_a l_a).$$

Геометрические размеры берут по чертежу электромагнитной цепи (обозначения см. на рис. 2.38). Здесь: $k_\Phi (\xi) = (1 + \xi - 2\xi^2)/2$; $\xi = D_{\text{в.в}}/D_{\text{вн}}$; $\pi^2 \approx 10$; $x = D_{\text{п}}/D_{\text{вн}}$.

Величины магнитных потоков на участках ($F_{\text{в}} = \Sigma F$):

$$\Phi_{\sigma_1} = F_{\text{в}} \frac{\lambda_1 \lambda_{a1}}{\lambda_1 + \lambda_{a1}}; \quad \Phi_{\sigma_2} = F_{\text{в}} \frac{\lambda_2 \lambda_{a2}}{\lambda_2 + \lambda_{a2}}; \quad \Phi_{\sigma_3} = F_{\text{в}} \frac{\lambda_3 \lambda_{a3}}{\lambda_3 + \lambda_{a3}};$$

$$\Phi_{\sigma_4} = F_{\text{в}} \frac{\lambda_4 \lambda_{\delta\kappa} \lambda_{a4}}{\lambda_{\delta\kappa} \lambda_{a4} + 2\lambda_4 \lambda_{a4} + \lambda_4 \lambda_{\delta\kappa}};$$

$$\Phi_\delta = F_{\text{в}} \frac{\lambda_\delta \lambda_{\delta\kappa} \lambda_{a5}}{2\lambda_{\delta\kappa} \lambda_{a5} + 2\lambda_\delta \lambda_{a5} + \lambda_\delta \lambda_{\delta\kappa}}.$$

Магнитный поток в магнитопроводе в среднем сечении

$$F_{\text{в}} = \Phi_\delta + \Phi_\sigma.$$

Отсюда можем определить коэффициент рассеяния $\sigma = 1 + \Phi_\sigma/\Phi_\delta$, а также проверить правильность расчета сечений участков магнитопровода по методикам, приведенным выше.

2.10 РАСЧЕТ СИЛ ОДНОСТОРОННЕГО ПРИТЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СММ

В магнитных механизмах вследствие торцового или эксцентричного расположения ферромагнитных деталей, проводящих магнитный поток, возникают силы одностороннего притяжения, направленные в сторону

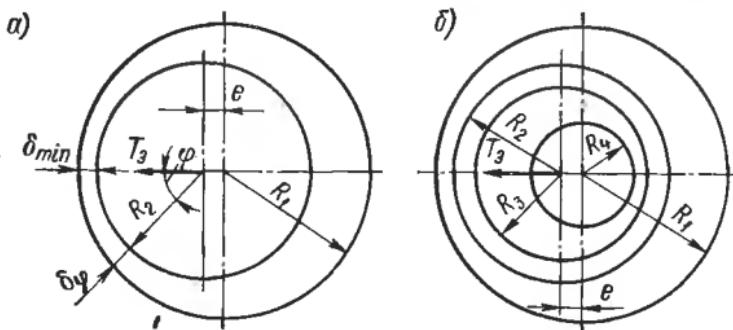


Рис. 2.40. К расчету сил одностороннего притяжения элементов магнитных механизмов

минимального зазора. В муфтах эксцентризитет полумуфт возникает вследствие неточностей изготовления, люфтов в опорах и износа. В магнитных редукторах эксцентризитет элементов механизма является органическим свойством, так же как торцовое расположение ведущей и

ведомой частей торцовых муфт вращения и ряда механизмов поступательного перемещения.

Расчет сил одностороннего притяжения важен при конструировании СММ и выборе подшипников. Возможны два случая эксцентричного расположения для цилиндрических взаимодействующих элементов [6]:

1) один элемент расположен эксцентрично относительно другого (рис. 2.40, а), что соответствует цилиндрическим СММ с магнитом или обмоткой возбуждения в подвижных частях;

2) эксцентричное расположение полого цилиндра между концентричными наружным и внутренним элементами механизма, что встречается в СММ с неподвижным магнитом или обмоткой возбуждения (рис. 2.40, б).

Рассмотрим первый случай. Сила (Н) одностороннего притяжения

$$T_s = \psi F_\delta^2 k_e.$$

Здесь $\psi = l_3/D_1$, где $D_1 = 2R_1$; $k_e = 1,97 \cdot 10^{-6} (D_1/\delta)^2 e / (1 - e^2)^{3/2}$. Осевая эквивалентная длина взаимодействующих зубцовых поверхностей $l_3 = k_{bz} l$. Для беззубцовых поверхностей $l_3 = l$.

Во втором случае результирующая сила (Н) складывается из сил притяжения цилиндра к наружному и внутреннему цилиндром

$$T_s = T_{s1} + T_{s2},$$

где $T_{s1} = \psi_1 F_{\delta_1}^2 k_{e1}$; $T_{s2} = \psi_2 F_{\delta_2}^2 k_{e2}$; F_{δ_1} и F_{δ_2} — разность магнитных потенциалов между поверхностями снаружи и внутри полого цилиндра, А; $\delta_1 = R_1 - R_2$; $\delta_2 = R_3 - R_4$; $\psi_1 = l_{s1}/D_1$; $\psi_2 = l_{s2}/D_3$; $e_1 = e/\delta_1$; $e_2 = e/\delta_2$; $k_{e1} = 1,97 \cdot 10^{-6} (D_1/\delta_1)^2 e_1 / (1 - e_1^2)^{3/2}$; $k_{e2} = 1,97 \cdot 10^{-6} \times (D_3/\delta_2)^2 e_2 / (1 - e_2^2)^{3/2}$.

Сила притяжения торцовых или плоских элементов СММ может быть определена по формуле

$$T_t = \frac{10^6}{245,2} \frac{\Phi^2}{S},$$

где Φ — магнитный поток, Вб; S — площадь торцовых или плоских элементов, через которые проходит магнитный поток, м². Выразив поток через индукцию в зазоре и площадь, получим

$$T_t = \frac{10^6}{245,2} B^2 S.$$

3

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ СММ

3.1

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ СММ

В магнитных механизмах охлаждению подлежат экраны (при значительных тепловыделениях), подшипники, а также обмотки возбуждения (в электромагнитных системах). Тепловой поток от источников тепла отводится в окружающую среду благодаря внутренней теплопроводности и теплопередаче поверхностей, контактирующих с охлаждающей средой. Наиболее распространены следующие способы охлаждения элементов СММ:

экрана — обдувкой газом (в частности, воздухом); жидкостью, циркулирующей в рабочем зазоре механизма; теплопередачей в корпус СММ; комбинацией перечисленных способов;

подшипников — теплопередачей в корпус СММ;

неподвижной обмотки возбуждения — теплопередачей в корпус СММ при естественном или искусственном его охлаждении воздухом или жидкостью;

подвижной обмотки возбуждения — естественной теплопередачей; обдувкой поверхности.

Выбор вида охлаждения определяется потерями и техническим заданием на разработку механизма. Преимущество следует отдавать воздушному охлаждению, так как оно проще реализуется.

Задача теплового расчета сводится к определению превышения температуры в отдельных частях СММ при заданных тепловых потоках и тепловых сопротивлениях элементов конструкции на номинальном режиме работы СММ [8, 16, 20, 27]. Температура обмотки возбуждения и других деталей механизма должна быть близкой к максимально допустимой. По нагревостойкости изоляционные материалы в соответствии с ГОСТ 8865—70 разделяются на классы с различной допустимой температурой при длительном режиме работы (см. гл. 5). Превышение допустимых температур резко снижает срок службы изоляции. Для машин с ограниченным ресурсом (до нескольких сотен часов службы) допустимые температуры могут быть повышенны до значений: для класса *A* — 155° С, *B* — 175° С, *F* — 200° С, *H* — 220° С. При ограничении срока службы можно принять более высокие допустимые температуры для смазки подшипниковых узлов. Для консистентной смазки и ресурса нескольких тысяч часов допустима температура до 150° С; для жидкой принудительной смазки и ресурса несколько тысяч часов — до 200° С. Температура самой горячей точки механизма должна быть не выше принятой допустимой. Предельно допустимые средние перегревы при длительном режиме работы и температуре окружающего воздуха 40° С должны иметь величины, приведенные в табл. 1.2.

Алгоритм теплового расчета:

1. Определяются источники тепла и тепловые потоки, равные мощности потерь в этих источниках.
2. Определяются коэффициенты теплоотдачи рассеивающих поверхностей и скорость охлаждающей среды.
3. Определяются по заданной температуре поверхности и по отводимой мощности площади поверхностей, через которые отводится тепло, а также перепад температур между поверхностью и охлаждающей средой.
4. Определяются пути тепловых потоков от источников тепла к рассеивающим тепло поверхностям.
5. Находятся по таблицам коэффициенты теплопроводности материалов конструкций.
6. Определяется перегрев элементов конструкции.

Пункт 3 может быть сформулирован и иначе. Для полученных по результатам разработки поверхностей и по известной отводимой мощности определяется температура поверхностей и перепад температур между ними и охлаждающей средой. Расчет примет проверочный характер. В случае перегрева элементов конструкции выше допустимого следует изменить площадь рассеивающей поверхности и произвести повторный расчет. При расчете необходимо принять, что температура магнитопровода механизма по всему объему одинакова.

При естественном воздушном охлаждении перепад температур между теплорассеивающей поверхностью и охлаждающим воздухом

$$\theta_{\Pi} = P_{\Pi} \varepsilon / (\alpha S_{\Pi}),$$

где θ_{Π} — перепад температур, $^{\circ}\text{C}$; P_{Π} — рассеиваемая мощность, Вт ; ε — величина повторности включения (ПВ) в долях единицы при повторно-кратковременном режиме; S_{Π} — площадь теплорассеивающей поверхности, см^2 ; α — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, при давлении 760 мм рт. ст. $\alpha = \alpha_0$. Значения коэффициента теплопередачи α_0 для различных видов поверхностей в воздухе при естественном охлаждении следующие:

	$\alpha_0 \cdot 10^3$, $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
Поверхность изоляции, покрытая лаком	1,22
Поверхность стали, покрытая лаком	1,67
Поверхность стали, тонко шпаклеванная и покрытая лаковой краской	1,42
Поверхность лакированных частей из меди	1,33
Поверхность экрана	1,4

При снижении плотности воздуха расчетное значение

$$\alpha = \alpha_0 (p/760)^{0,8},$$

где α_0 — значение коэффициента теплопередачи при давлении 760 мм рт. ст.; p — рабочее давление воздуха, мм рт. ст.

Площадь поверхности, рассеивающей тепло, может быть определена зависимостью

$$S_{\Pi} = S_k k_{\Pi},$$

где S_k — площадь наружной поверхности корпуса; k_n — коэффициент увеличения поверхности, зависящий от ее характера. Для гладкой поверхности $k_n = 1$. При наличии на внешней поверхности ребер

$$k_n = 1 + \frac{h_p}{t_p} k_p,$$

где h_p — высота ребер; t_p — шаг ребер; k_p — коэффициент, учитывающий, что не вся поверхность корпуса обработана, $k_p = 0,7 \div 0,8$. Принимают $h_p/t_p = 1 \div 2$.

Для естественного охлаждения принимают меньшие значения. Толщину ребер a_p берут по конструктивным соображениям не менее 1 мм, и обычно она составляет $(0,1 \div 0,2) t_p$. Температура поверхности $t_n = t_o + \theta_n$, где t_o — температура окружающего воздуха.

При искусственном воздушном охлаждении перепад температур между рассеивающей поверхностью и охлаждающим воздухом

$$\theta_n = \left[\frac{2,92 \epsilon P_n}{S_n \alpha_0 (1 + k_{\text{обд}} \sqrt{v}) (p/760)^{0,8}} \right]^{3/4},$$

Здесь v — средняя скорость (м/с) воздуха, обдувающего охлаждаемую поверхность (для вращающихся катушек возбуждения v — линейная скорость); $k_{\text{обд}}$ — коэффициент интенсивности обдувания, для вращающихся или неподвижных многослойных катушек возбуждения $k_{\text{обд}} = 0,8$, для наружной поверхности корпуса $k_{\text{обд}} = 0,5$, для поверхности экрана $k_{\text{обд}} = 0,6$; $S_n = S_k k_n$, где

$$k_n \approx 1 + \frac{2h_p}{t_p} \left(1 - \frac{0,5}{1 + 0,5 \sqrt{v}} \right) k_p.$$

Среднюю скорость воздуха берут 10—35 м/с. Большие значения принимаются при наличии направляющего кожуха. Необходимый расход ($\text{м}^3/\text{с}$) охлаждающего воздуха

$$Q_B = \frac{P_n}{\rho c_p \theta_B},$$

где ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$, при давлении p и температуре T ; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении 760 мм рт. ст., $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; θ_B — температура перегрева воздуха, $^\circ\text{C}$,

$$\theta_B = t_{B_2} - t_{B_1},$$

где t_{B_1} — температура поступающего воздуха, $t_{B_1} = 20 \div 40^\circ\text{C}$; t_{B_2} — температура выходящего воздуха.

Величину θ_B определяют по рис. 3.1.

Плотность воздуха при давлении p и температуре T

$$\rho = \rho_0 \frac{273,15}{T} \frac{p}{p_0},$$

где ρ_0 — плотность при давлении $p_0 = 760$ мм рт. ст. и 0°C , $\rho_0 = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$; $T = (t_{B_1} + t_{B_2})/2 + 273$.

Величины c_p и ρ_0 при давлении 760 мм рт. ст. приведены в табл. 3.1.

Расход воздуха и его скорость связаны соотношением

$$v = \frac{Q_{\text{в}}}{kh_p(t_p - a_p)},$$

где k — число ребер.

При искусственном водяном охлаждении используется охлаждение корпуса жидкостью, протекающей в каналах, и полостное охлаждение экрана соприкасающейся с ним жидкостью. Каналы выполняются прямыми или спиральными и могут иметь прямоугольную или трапециoidalную форму поперечного сечения.

Средний перегрев ($^{\circ}\text{C}$) охлаждающей воды

$$\begin{aligned} t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}} &= \theta_{\text{вод}} = \\ &= \epsilon P_{\pi} / (Q_{\text{вод}} c_V), \end{aligned}$$

где $t_{\text{вых}}$ и $t_{\text{вх}}$ — температура воды на выходе и входе системы охлаждения; $Q_{\text{вод}}$ — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; c_V — объемная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Значения c_V приведены ниже в табл. 3.3. Принимают обычно $\theta_{\text{вод}} = 10 \div 30^{\circ}\text{C}$; скорость движения воды $v_{\text{вод}} = 1 \div 2 \text{ м/с}$; $t_{\text{вх}} = 20 \div 60^{\circ}\text{C}$.

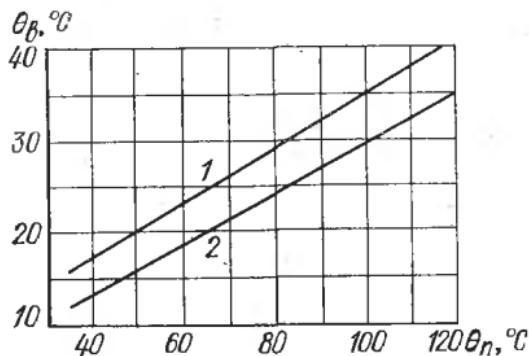


Рис. 3.1. Зависимость $\theta_{\text{в}} = f(\theta_{\pi})$:

1 — аксиальный обдув оребренной поверхности; 2 — аксиальный обдув неоребренной поверхности

Таблица 3.1. Значения c_p и ρ_0 при 760 мм рт. ст.

$t, ^{\circ}\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\frac{c_p}{\text{кДж}} \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\frac{c_p}{\text{кДж}} \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$
-50	1,548	1,013	60	1,060	1,005
-40	1,515	1,013	70	1,029	1,009
-30	1,453	1,013	80	1,000	1,009
-20	1,395	1,009	90	0,972	1,009
-10	1,342	1,009	100	0,946	1,009
0	1,293	1,005	120	0,898	1,009
10	1,247	1,005	140	0,854	1,013
20	1,205	1,005	160	0,815	1,017
30	1,165	1,005	180	0,779	1,022
40	1,128	1,005	200	0,746	1,026
50	1,093	1,005			

Средняя температура охлаждающей воды $\theta_{\text{вод.ср}} = t_{\text{вх}} + 0,5\theta_{\text{вод}}$. Отсюда расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$) $\dot{V}_{\text{вод}} = \epsilon P_{\text{п}} / (Q_{\text{вод}} c V)$.

Поперечное сечение (м^2) всех каналов охлаждения при $\theta_{\text{вод}}$

$$\sum S_k = Q_{\text{вод}} / v_{\text{вод}}.$$

Поверхность (м^2) теплообмена определяется формулой

$$S_{\text{п}} = \frac{\epsilon P_{\text{п}}}{\alpha (t_k - \theta_{\text{вод.ср}})},$$

где t_k — температура корпуса, $^{\circ}\text{C}$; α — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Коэффициент теплопередачи зависит от режима течения жидкости, температуры и свойств ее. Значения α определяются зависимостью

$$\alpha = Nu \lambda / d_r.$$

Здесь Nu — критерий Нуссельта; λ — коэффициент теплопроводности жидкости при температуре $\theta_{\text{вод.ср}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; d_r — эквивалентный гидравлический диаметр канала, м,

$$d_r = 4q / \Pi_k,$$

где q — сечение одного канала, м^2 ; $q = \sum S_k / n_k$; n_k — число каналов; Π_k — периметр канала, м.

Величина Nu определяется критериями:

$$Re = v_{\text{вод}} d_r / v; \quad Pr = v / a,$$

где $v_{\text{вод}}$ — скорость течения жидкости, $\text{м}/\text{с}$; d_r — эквивалентный диаметр канала, м; v — кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

При $Re \ll 2000$ (ламинарный режим течения) для круглого канала при $RePr d_r / L > 12$ $Nu = 1,615 (RePr d_r / L)^{1/3}$; при $RePr d_r / L \ll 12$ $Nu = 3,66$. Формулы точны для круглых каналов, но дают погрешности для каналов иной формы.

Для плоской щели ($Re = 2\delta v_{\text{вод}} / v$) при $2RePr\delta / L > 70$ $Nu = 1,85 (2RePr\delta / L)^{1/3}$; при $2RePr\delta / L \ll 70$ $Nu = 7,6$. Здесь L — длина канала, м, $L = S_{\text{п}} / (n_k \Pi_k)$; δ — расстояние между стенками щели.

При $Re > 4000$ (турбулентный режим течения) для каналов любого сечения

$$Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (Pr / Pr_{ct})^{0.06} k_l.$$

Для прямоугольного канала со сторонами a и b

$$Re = \frac{2abv_{\text{вод}}}{(a+b)v}.$$

Здесь Pr и Re рассчитывают при средней температуре жидкости $\theta_{\text{вод.ср}}$, Pr_{ct} — при средней температуре стенки канала t_k .

Влияние начального участка канала на величину Nu учитывается коэффициентом k_l , приведенным в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Значение коэффициента k_i

$Re \cdot 10^{-4}$	r	L/d_r								
		1	2	5	10	15	20	30	40	50
1	1,65	1,5	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1,0	
2	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,0	
5	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,0	
10	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,0	
100	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,0	

Для расчета теплопередачи в кольцевой щели около экрана можно воспользоваться формулой

$$Nu = 0,015 Re^{0,8} Pr^{0,4} (D_{\text{нар}}/D_{\text{вн}})^{0,25}.$$

При этом в формулах α и Re $d_r = D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}$, где $D_{\text{нар}}$ и $D_{\text{вн}}$ — наружный и внутренний диаметры кольцевой щели.

Для спиральных каналов значения Nu следует умножить на поправочный коэффициент $k_R = 1 + 1,77d_r/R$, где R — радиус кривизны канала.

Критическое значение Re , при котором происходит изменение режима течения, для спиральных каналов при $3 < R/d_r < 12$ $Re = 2300 + 10500 (d_r/R)^{0,3}$.

В области значений $2300 < Re < 4000$ и $Pr \geq 0,5$ при $L/d_r > 30$

$$Nu = 21 (Pr d_r/L)^{0,333} (Re/2300)^{\lg \frac{L}{d_r}} \quad \text{при } Re \text{ Pr } d_r/L > 12;$$

$$Nu = 3,66 (Re/2300)^{2,3+\lg Pr} \quad \text{при } Re \text{ Pr } d_r/L < 12.$$

Физические параметры воды приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Физические параметры воды

$t, ^\circ C$	$\lambda \cdot 10^4, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot {}^\circ \text{C})$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr	$c_V, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot {}^\circ \text{C})$
0	5510	1,789	13,1	13,67	4212
10	5740	1,306	13,7	9,52	4190
20	5990	1,006	14,3	7,02	4175
30	6180	0,805	14,9	5,42	4156
40	6350	0,659	15,3	4,31	4141
50	6480	0,556	15,7	3,54	4124
60	6590	0,478	16,0	2,98	4108
70	6680	0,415	16,3	2,55	4094
80	6740	0,365	16,6	2,21	4077
90	6800	0,326	16,8	1,95	4062
100	6830	0,295	16,9	1,75	4044

РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Для расчета теплопередачи необходимо определить тепловые сопротивления следующих элементов конструкций:

1. Плоская стенка без источников тепла (изоляции, магнитопровод, конструктивные элементы, в которых температура изменяется в одном направлении). Передаваемая тепловая мощность (Bt)

$$P = \frac{\lambda}{\delta} F (t_1 - t_2),$$

где λ — коэффициент теплопроводности, $Bt/(m \cdot K)$; δ — толщина стенки, м; F — площадь стенки, m^2 ; $t_1 - t_2$ — разность температур с двух сторон стенки.

Тепловое сопротивление стенки $R = \delta/(\lambda F)$, проводимость $\Lambda = 1/R = \lambda F/\delta$.

Для многослойной стенки

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i F_i},$$

где λ_i и δ_i — теплопроводность и толщина отдельных слоев. При одинаковых F_i

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}.$$

Значения коэффициента теплопроводности λ приведены в табл. 3.4. Эквивалентная теплопроводность многослойной стенки с учетом теплового сопротивления переходов от слоя к слою

$$\lambda_{\text{экв}} = \delta \left(\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)^{-1}.$$

2. Плоская стенка с внутренним источником тепла (проводники)

$$R = \delta/(2\lambda F).$$

3. Цилиндрическая стенка без источников тепла

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{D_2}{D_1},$$

где D_1 — внутренний диаметр стенки; D_2 — наружный диаметр стенки; l — осевая длина.

При толщине стенок $\delta \ll D_2/2$

$$R = (D_2 - D_1)/(2\pi l D_1 \lambda).$$

Таблица 3.4. Значения коэффициента теплопроводности

Материал	λ , Вт/(м · К)	Материал	λ , Вт/(м · К)
Изоляция класса A: непропитанная	0,1	Эмаль	1,97
пропитанная	0,1—0,15	Сталь 1Х18Н9Т	14,95 (при 0° C) 16,15 (при 100° C) 15,2 (при 200° C)
Изоляция класса B	0,15—0,22	Алюминий	202 (при 0° C) 205,5 (при 100° C) 228,3 (при 200° C)
Микалента	0,26	Медь	386,1 (при 0° C) 379,1 (при 100° C)
Стеклоткань	0,8—1,0	Титан	373,1 (при 200° C)
Лакоткань	0,21—0,25	Сталь Э11, Э21	15,1 (при 0° C) 15,7 (при 100° C)
Лакошелк	0,25	Сталь Э31, Э41	16,8 (при 200° C)
Электро- картон	0,25	Чугун	60—63
Гетинакс и текстолит	0,17—0,3	Сталь Ст0	35
Стекло- текстолит	0,251—0,331	Сталь 15 (отожженная)	47
Винипласт	0,163	Сталь 45 (отожженная)	102,0 (при —200° C) 78,3 (при 20° C) 61,1 (при 200° C) 52,3 (при 0° C) 53,4 (при 100° C) 53,3 (при 200° C)
Фторопласт-4	0,243—0,26		45,9 (при 0° C) 47,8 (при 100° C) 47,1 (при 200° C)
Кабельная бумага	0,13		
Пропитанная лаком бумага	0,27		
Хлопчатобумажная ткань	0,26		

Эквивалентная теплопроводность

$$\lambda_{\text{экв}} = \ln \frac{D_{n+1}}{D_n} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i}}.$$

4. Цилиндрическая стенка с внутренним источником тепла

$$R = D_2 / (4\lambda).$$

5. Контакт деталей конструкции. Тепловое сопротивление контакта деталей определяется шероховатостью поверхностей деталей и характером сопряжения (т. е. классом шероховатости поверхностей и натягом

соприкасающихся деталей). Принимают вследствие малой деформации микронеровностей, что в месте стыка деталей имеется воздушный зазор, толщина которого равна сумме высот шероховатостей контактирующих поверхностей. В этом случае

$$R = (h_{\max 1} + h_{\max 2})/(2\lambda_c F),$$

где λ_c — коэффициент теплопроводности воздуха в тонком слое, $\lambda_c = 0,025 \div 0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $h_{\max 1}$ и $h_{\max 2}$ — максимальные высоты неровностей контактирующих поверхностей, м, имеющие следующие величины:

Класс шероховатости поверхности деталей

Высота неровностей $h \cdot 10^6$, м

1	320
2	160
3	80
4	40
5	20
6	10
7	6,3
8	3,2
9	1,6

Зная эквивалентное тепловое сопротивление ($\text{Вт}/\text{К}$), можно определить перегревы отдельных элементов конструкции $\Delta t = P/R$ и их температуру $t = \Delta t + t_k$.

3.3

РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ВЕНТИЛЯТОРА

Выше (см. п. 3.1) был определен расход воздуха, необходимый для искусственного охлаждения, и скорость его протекания над охлаждаемыми поверхностями. Для реализации воздушного охлаждения необходимо определить требуемый напор, рассчитать воздухопроводы и вентилятор [4, 30]. В зависимости от назначения магнитные механизмы могут быть выполнены как с самоохлаждением, так и с охлаждением от вспомогательного вентилятора (тихоходные системы или системы с переменной частотой вращения).

Напор воздуха H (Па), обеспечивающий необходимый расход Q_B , складывается из скоростного напора H_d и статического H_{st}

$$H = H_d + H_{st}.$$

Величина $H_d = \rho v^2/2$ или $H_d = \rho Q_B^2/(2S^2)$, где ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; v — скорость воздуха, $\text{м}/\text{с}$; Q_B — расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; S — сечение выходного отверстия, м^2 .

Величина H_{st} определяется потерями статического напора (Па) на различных участках воздухопровода. На каждом участке

$$H_{st i} = \gamma H_{di},$$

где γ — коэффициент аэродинамического сопротивления.

Для длинных каналов малого сечения $\gamma = 0,05l/d$, где l — длина канала, м; d — диаметр или эквивалентный диаметр, м.

Для некруглых каналов

$$d = \sqrt{4S/\pi},$$

где S — площадь канала. Значения γ для наиболее часто встречающихся случаев приведены в табл. 3.5.

Т а б л и ц а 3.5. Значения коэффициента γ

Элементы воздуховода	Форма канала	γ
Вход в канал с острыми краями		0,8
Вход в канал с закругленными краями		0,25 при $r = (0,25 \div 0,5) d$
Резкое изменение сечения канала — вход		0,7 $(1 - S_1/S_2)$
Резкое изменение сечения канала — выход		$(1 - S_1/S_2)$
Постепенное сужение		0,1
Поворот струи на 90°		1,0
Поворот под углом β (края острые)		1,0 при $\beta = 90^\circ$ 0,5 при $\beta = 135^\circ$

При 20°C и 760 мм рт. ст. напор, Па,

$$H_d = 0,6Q_b^2/S^2;$$

$$H_{ct} = 0,6\gamma Q_b^2/S^2.$$

Для всего воздуховода

$$H_{\text{ст}} = z Q_{\text{в}}^2,$$

где z — аэродинамическое сопротивление воздуховода, кг/м⁷;

$$z = \sum \gamma \frac{\rho}{2S_n^2},$$

где S_n — сечение канала на отдельном участке.

Для создания воздушного потока могут быть использованы центробежные или осевые (пропеллерные) вентиляторы. В центробежном

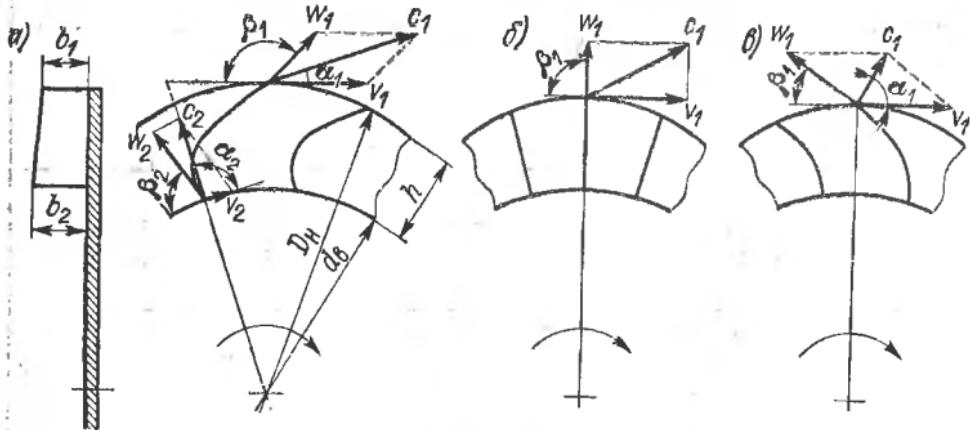


Рис. 3.2. Расположение лопаток центробежного вентилятора: *а* — по направлению вращения ($\beta_1 > 90^\circ$); *б* — радиальное ($\beta_1 = 90^\circ$); *в* — против направления вращения ($\beta_1 < 90^\circ$)

вентиляторе воздух перемещается под действием центробежных сил радиально (перпендикулярно оси вращения). В осевом вентиляторе воздух перемещается вдоль оси вращения вентилятора. Для больших напоров и небольших расходов воздуха предпочтительно использование центробежных вентиляторов, для малых напоров и больших объемных потоков — осевых вентиляторов. Центробежные вентиляторы могут иметь радиальные или наклонные лопатки. Первые используются в реверсивных, вторые — в нереверсивных устройствах. Лопатки, загнутые против вращения, обеспечивают получение более равномерного воздушного потока, но не обеспечивают высокого к. п. д. вентилятора. Схема расположения лопаток показана на рис. 3.2. Изготавливаются вентиляторы литьем или штамповкой.

Исходными данными для расчета вентилятора являются: расход воздуха $Q_{\text{в}}$, м³/с; напор вентилятора H , Па; частота вращения n , об/мин.

Расчет центробежного вентилятора. Размеры колеса вентилятора могут быть рассчитаны по формулам:

$$D_{\text{н}} = 4,451 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{в}}}{kn}},$$

$$d_{\text{в}} = \frac{60}{\pi n} \sqrt{-\frac{H}{0,75 \eta_{\text{а,0}}} + \left(\frac{\pi D_{\text{н}} n}{60} \right)^2}.$$

где D_n — внешний диаметр колеса вентилятора, м; k — коэффициент, учитывающий выполнение лопаток ($k = 0,42$ — для радиальных лопаток, $k = 0,5$ — для загнутых по направлению вращения, $k = 0,35$ — для загнутых против направления вращения); d_b — внутренний диаметр колеса, м; $\eta_{a.o}$ — аэродинамический к. п. д. вентилятора при холостом ходе ($\eta_{a.o} = 0,6$ — для вентилятора с радиальными лопатками, $\eta_{a.o} = 0,75$ — с лопатками, загнутыми по направлению вращения, $\eta_{a.o} = 0,5$ — с лопатками, загнутыми против направления вращения); ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Обычно внешний диаметр вентилятора D_n принимается по конструктивным соображениям, близким к размеру корпуса. Внутренний диаметр (м) колеса $d_b \approx (0,65 \div 0,8) D_n$. Высота (м) лопатки $h = (D_n - d_b)/2$. Шаг (м) лопаток по внутреннему диаметру $\tau = k_l h$, где $k_l = 1$ — при радиальных лопатках; $k_l = 0,6$ — при лопатках, загнутых вперед по направлению вращения; $k_l = 0,8$ — при лопатках, загнутых назад, против направления вращения. Число лопаток $n_l = \pi d_b / \tau$. Принимается ближайшее большее число лопаток из ряда 6, 8, 9, 12, 16, 18.

Окружные скорости (м/с) колеса: по наружному диаметру — $v_1 = \pi D_n n / 60$; по внутреннему диаметру — $v_2 = \pi d_b n / 60$.

Абсолютная скорость (м/с) газа на входе в рабочее колесо

$$c_2 = \frac{4Q_b}{\pi d_b^2}.$$

Для получения максимальной производительности необходимо, чтобы $\alpha_2 = 90^\circ$. Тогда $\beta_2 = \arctg c_2/v_2$. В реальных конструкциях $\beta_{2p} = \beta_2 + (2 \div 5)^\circ$.

Относительная скорость воздуха на входе в рабочее колесо

$$w_2 = \sqrt{c_2^2 + v_2^2}.$$

Относительная скорость воздуха на выходе из колеса вентилятора $w_1 = w_2$.

Для уменьшения потерь на сходе воздуха с лопаток необходимо, чтобы $\alpha_1 \ll 20^\circ$. Тогда

$$\frac{w_1 \sin \beta_1}{w_1 - w_1 \cos \beta_1} \ll \operatorname{tg} 20^\circ.$$

Отсюда определяется величина угла β_1 . В реальных конструкциях $\beta_{1p} = \beta_1 + (2 \div 5)^\circ$.

Ширина лопатки на входе $b_2 = (1,05 \div 1,25) d_b / 4$.

Ширина лопатки на выходе колеса $b_1 = b_2 d_b / D_n$.

Лопасть может быть выполнена также постоянной ширины (м). В этом случае $b = (0,11 \div 0,15) D_n$.

Для определения истинного напора и расхода вентилятора следует построить характеристику вентилятора. Она строится по зависимости

$$H = H_0 [1 - (Q_b/Q_{bm})^2],$$

где H_0 — напор при отсутствии расхода; Q_{bm} — расход при отсутствии потерь напора.

Характерные точки характеристики:

$$\text{при } Q_B = 0 \quad H_0 = \eta_{a. o} \rho (v_1^2 - v_2^2);$$

$$\text{при } H = 0 \quad Q_{Bm} = kv_1 S_{Bx},$$

где S_{Bx} — входное сечение вентилятора, м^2 , $S_{Bx} = 0,92\pi D_h b_2$.

Для определения рабочей точки вентиляционной системы строятся кривые $H = f(Q_B)$ и $H_{ct} = zQ_B^2$ (рис. 3.3). Пересечение кривых

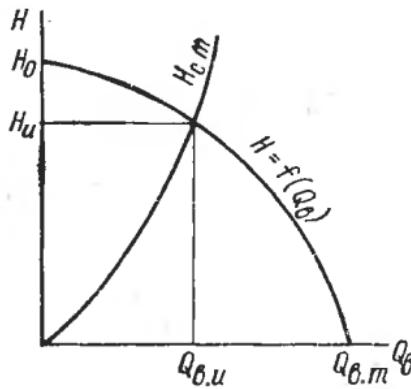


Рис. 3.3. График для определения рабочей точки вентиляционной системы

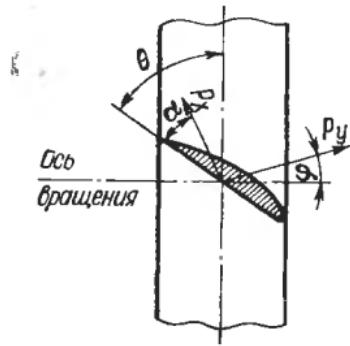


Рис. 3.4. Схема осевого вентилятора

определяет действительный расход $Q_{B,i}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) и напор H_i (Па). Анализически эти значения определяются соотношениями:

$$Q_{B,i} = Q_{Bm} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + zQ_{Bm}^2}};$$

$$H_i = \frac{H_0 z Q_{Bm}^2}{H_0 + z Q_{Bm}^2}.$$

Вентилятор имеет максимум к. п. д. при расходе $Q_B = Q_{Bm}/2$ и напоре $H = 0,75H_0$. Полученные значения должны соответствовать заданным.

Мощность (Вт), потребляемая вентилятором,

$$P_B = H_i Q_{B,i} / \eta_\vartheta,$$

где η_ϑ — энергетический к. п. д. вентилятора, $\eta_\vartheta = 0,15 \div 0,2$.

Расчет осевого вентилятора. Осевой вентилятор при наличии кожуха создает аксиальный поток воздуха, без кожуха — кроме аксиального также и радиальный. Колесо вентилятора содержит радиальные лопасти, развернутые относительно плоскости колеса на угол θ (угол установки). Угол θ меняется по высоте по закону $\operatorname{tg} \theta_2 = \operatorname{tg} \theta_1 d_B/D_h$, где θ_1 — угол у основания лопастей; θ_2 — угол у внеш-

нега края лопастей; d_B — диаметр основания лопастей; D_H — диаметр внешнего края лопастей. Иногда θ берется постоянным по длине лопасти

$$\theta = \varphi + \alpha,$$

где φ — угол притекания потока, переменный по высоте лопасти, среднее значение угла $\varphi_{cp} \approx 25^\circ$; α — угол атаки, $8^\circ < \alpha < 12^\circ$.

При вращении возникают силы — подъемная P_y и лобового сопротивления P_x . Отношение $P_y/P_x = 10 \div 15$ называется коэффициентом качества крыла. Схема размещения лопасти показана на рис. 3.4.

Из условий получения высокого К. п. д.

$$D_H = (4,602 \div 5,454) \sqrt[3]{Q_B/n}.$$

При заданной осевой скорости воздуха v_0 , м/с

$$d_B = \sqrt{D_H^2 - \frac{Q}{0,628v_0}}.$$

Величины D_H и d_B могут также определяться конструкцией устройства. Тогда осевая скорость воздуха

$$v_0 = \frac{Q_B}{0,628(D_H^2 - d_B^2)}.$$

Высота лопасти $h = (D_H - d_B)/2$. Обычно отношение $h/b_{cp} = 1 \div 2$, где b_{cp} — средняя ширина лопасти. Отсюда $b_{cp} = (0,5 \div 1)/h$.

Число лопастей

$$n_L = (1,1 \div 1,2) \pi d_B / b_{cp}.$$

Желательно, чтобы

$$\frac{\pi (D_H + d_B)}{2n_L} > b_{cp}.$$

Следует проверить величину развиваемого напора. Должно соблюдаться с точностью не менее 10% равенство

$$\rho \frac{v_0^2 + (v_{cp} - v_{u, cp})^2}{0,5\pi (D_H + d_B)} n_L b_{cp} (c_y \cos \varphi_{cp} - c_x \sin \varphi_{cp}) = \\ = H + 0,062v_0^2 + 0,05v_{u, cp}^2,$$

где ρ — плотность воздуха; v_{cp} — окружная скорость на середине лопасти, $v_{cp} = \frac{\pi n}{60} \frac{D_H + d_B}{2}$; $v_{u, cp}$ — скорость закручивания струи

воздуха в середине лопасти, $v_{u, cp} = v_{cp} - \frac{v_0}{\operatorname{tg} \varphi_{cp}}$; c_y, c_x — опытные аэродинамические коэффициенты, зависящие от профиля крыла,

$$c_y \approx 0,47 + 0,05(\alpha - 8^\circ); \quad c_x \approx 0,032 + 7,5 \cdot 10^{-4}(\alpha - 8^\circ)^2.$$

Уточнению подлежат число лопастей и их ширина.

Размеры лопасти определяются формулами: ширина лопасти на диаметре d_B

$$b_B = b_{cp} (D_h + d_B) / (2d_B),$$

ширина лопасти на диаметре D_h

$$b_h = b_{cp} (D_h + d_B) / (2D_h).$$

Если в середине лопасти значение угла $\theta \theta_{cp} = \varphi_{cp} + \alpha$, то на диаметре d_B

$$\theta_B = \arctg \left(\frac{D_h + d_B}{2d_B} \operatorname{tg} \theta_{cp} \right);$$

на диаметре D_h

$$\theta_h = \arctg \left(\frac{D_h + d_B}{2D_h} \operatorname{tg} \theta_{cp} \right).$$

Аэродинамический к. п. д. вентилятора определяется как

$$\eta_a = \frac{c_y \cos \varphi_{cp} - c_x \sin \varphi_{cp}}{c_x \cos \varphi_{cp} + c_y \sin \varphi_{cp}} \frac{v_o}{v_{cp}}.$$

Зависимость $H = f(Q_B)$ можно построить, выразив напор

$$H = \rho'_{cp} v_{i, cp}^2 - 0,05 v_{i, cp}^2 - 0,062 v_o^2$$

в функции от Q_B при $v_o = f(Q_B)$.

Определение рабочей точки системы производится графически так же, как для центробежного вентилятора, построением на одном рисунке зависимостей $H = f(Q_B)$ вентилятора и $H_{ст} = zQ_B^2$ воздухо-проводка.

Мощность, потребляемая вентилятором,

$$P_B = H_i Q_{B, i} / (\eta_a \eta_M),$$

где η_a — аэродинамический к. п. д.; η_M — механический к. п. д., $\eta_M = 0,8 \div 0,9$.

3.4

РАСЧЕТ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Расчет жидкостного охлаждения состоит в определении напора, необходимого для создания в каналах устройства потока с необходимыми расходом и скоростью. Расчет ведется по участкам гидравлической цепи.

1. Потери напора в каналах при равномерном движении. Потери напора h по длине потока в прямом канале постоянного поперечного сечения

$$h = \lambda_T \frac{l}{d_f} \frac{v_{\text{вод}}^2}{2g},$$

где λ_t — коэффициент потерь на трение единицы относительной длины канала; g — ускорение силы тяжести; l — длина канала; d_r — гидравлический эквивалентный диаметр, $d_r = 4F/\Pi$; F — площадь поперечного сечения канала; Π — периметр его. Для круглой трубы $d_r = d$. Коэффициент λ_t зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости $\bar{\Delta} = \Delta/d_r$, где Δ — средняя высота шероховатости стенок каналов.

В зависимости от Re λ_t имеет значения:

$Re \dots$	2000	2500	3000	3500	1000	6000	8000
$\lambda_t \dots$	0,028	0,03	0,035	0,038	0,04	0,0360	0,0335
$Re \dots$	10 000	15 000	20 000	40 000	60 000	80 000	100 000
$\lambda_t \dots$	0,0315	0,0285	0,0270	0,0225	0,0200	0,0190	0,0180

Гидравлически гладкими являются цельностянутые медные и латунные трубы.

При ламинарном режиме течения ($Re < 2000$):
для круглого канала:

$$Re = \frac{v_{\text{вод}} d}{v}; \quad \lambda_t = \frac{64}{Re}; \quad h = \frac{128 v l Q_{\text{вод}}}{\pi g d^4};$$

для прямоугольных каналов с отношением сторон a/b ($a < b$):

$$Re = \frac{2abv_{\text{вод}}}{(a+b)v}; \quad \lambda_t = k_1 \frac{64}{Re}; \quad h = 8k_1 \frac{(a+b)^2}{a^2 b^2} \frac{vl v_{\text{вод}}}{g},$$

где коэффициент k_1 определяется в зависимости от соотношения сторон a/b по рис. 3.5;

для канала квадратного сечения со стороной a :

$$Re = \frac{av_{\text{вод}}}{v}; \quad \lambda_t = \frac{56,9}{Re}; \quad h = \frac{28,45vl v_{\text{вод}}}{ga^2};$$

для канала кольцевого сечения с наружной поверхностью $D_{\text{нар}}$ и внутренней $D_{\text{вн}}$:

$$Re = \frac{(D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}) v_{\text{вод}}}{v}; \quad \lambda_t = k_2 \frac{64}{Re},$$

$$h = 32k_2 \frac{1}{(D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}})^2} \frac{vl v_{\text{вод}}}{g}.$$

Коэффициент k_2 определяется по рис. 3.6 в зависимости от соотношения $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}}$. При $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}} \rightarrow 1$ щель становится узкой кольцевой и h может быть определена по формуле

$$h = \frac{12v}{g} \frac{lv_{\text{вод}}}{\delta^2},$$

где $\delta = 0,5(D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}})$. Полученное выражение может быть использовано для рассмотрения плоской щели.

При переходном режиме течения ($2000 < Re < 4000$) для гидравлически гладких каналов значения коэффициентов потерь на трение представлены выше.

Для каналов с шероховатостью стенок $\bar{\Delta} = 0,0001 \div 0,01$ и при $2000 < Re < 560/\bar{\Delta}$ λ_t рассчитывается по формуле

$$\lambda_t = \frac{1,42}{\left(\lg \frac{Re}{\bar{\Delta}} \right)^2}.$$

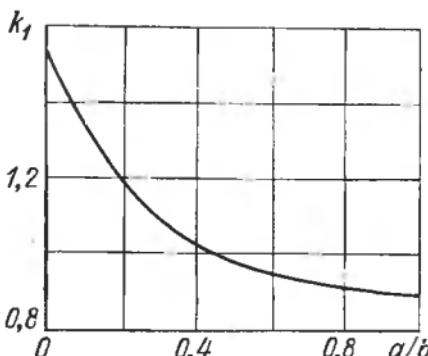


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента k_1 от отношения a/b

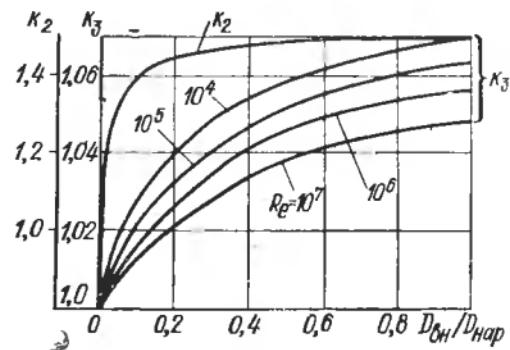


Рис. 3.6. Зависимость коэффициентов k_2 и k_3 от соотношения $D_{\text{вн}}/D_{\text{нап}}$

При турбулентном режиме течения ($4000 < Re < 100\,000$):
для гидравлически гладких круглых каналов коэффициент потерь на трение $\lambda_t = 0,3164 Re^{-0,25}$,

при произвольной шероховатости и $Re > 560/\bar{\Delta}$

$$\lambda_t = \left(2 \lg \frac{3,7}{\bar{\Delta}} \right)^{-2};$$

в других случаях может быть использована формула

$$\lambda_t = \left(2 \lg \frac{1}{\bar{\Delta}} + 1,14 \right)^{-2}.$$

В зависимости от $1/\bar{\Delta}$ коэффициент λ_t имеет значения:

$1/\bar{\Delta}$	...	100	200	300	400	500	600	700
λ_t	...	0,0379	0,0304	0,0269	0,0249	0,0230	0,0223	0,0216
$1/\bar{\Delta}$	...	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
λ_t	...	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0184	0,0181
$1/\bar{\Delta}$	...	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2500
λ_t	...	0,0178	0,0176	0,0173	0,0171	0,0169	0,0167	0,0159
$1/\bar{\Delta}$	...	3000	3500	4000	5000	6000	8000	10 000
λ_t	...	0,0153	0,0148	0,0144	0,0137	0,0132	0,0125	0,0120

Для каналов прямоугольного сечения с $a/b = 0.5 \div 2,0$ λ_t определяется по формуле для круглого канала.

Для каналов кольцевого сечения коэффициент сопротивления

$$\lambda_t = 0,3164 k_3 \operatorname{Re}^{-0,25} \text{ или } \lambda_t = k_3 \left(2 \lg \frac{3,7}{\Delta} \right)^{-2},$$

где k_3 определяется по рис. 3.6.

Для плоских щелей верны приведенные выше формулы, взятые при $D_{\text{ви}}/D_{\text{пар}} = 1,0$.

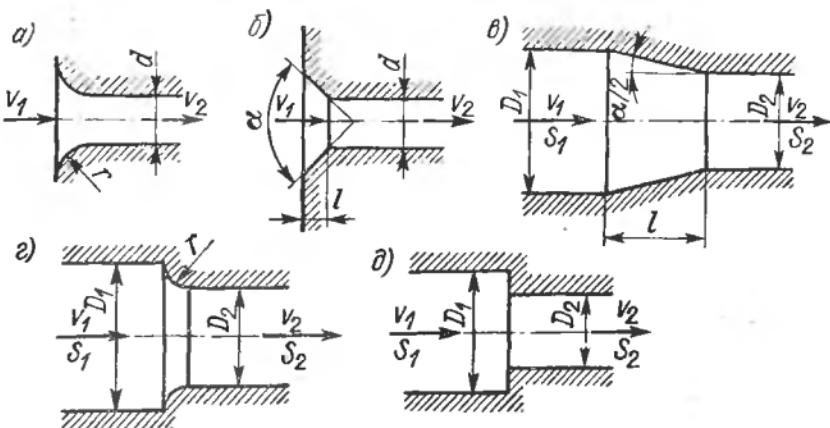


Рис. 3.7. Схемы геометрической формы местных сопротивлений: *а* и *б* — входы в трубу из резервуара; *в* — плавное сжатие струи; *г* — сжатие потока с закругленной кромкой; *д* — внезапное сжатие канала

2. Местные потери напора. Местные сопротивления вызывают изменения сечения потока или его направления, а также местные потери напора. Величина потеря определяется формулой

$$h = \xi v_2^2 / (2g),$$

где v_2 — средняя скорость потока в канале за местом потерь; ξ — коэффициент сопротивления, зависящий от геометрии местного сопротивления, числа Рейнольдса Re и шероховатости на участке местного сопротивления. В области чисел $Re > (1 \div 2) 10^5$ величина ξ не зависит от значения Re .

Различные виды местных сопротивлений показаны на рис. 3.7. Коэффициент ξ для входа в трубу из резервуара (рис. 3.7, *а*) в зависимости от r/d имеет значения:

r/d	0	0,02	0,04	0,08	0,1	0,12	0,16	$\geq 0,2$
ξ	0,5	0,37	0,26	0,15	0,1	0,09	0,06	0,03

Для случая, показанного на рис. 3.7, *б*, значения коэффициента ξ определяются по рис. 3.8. При уменьшении диаметра трубопровода потери определяются с учетом скорости потока после места потерь v_2 .

Для плавного сжатия потока (рис. 3.7, *в*) при $Re > 10^4$ коэффициент сопротивления

$$\xi = \xi' (1 - S_2/S_1) + \frac{\lambda_t}{8 \sin(\alpha/2)} [1 - (S_2/S_1)^2],$$

где ξ' определяется по рис. 3.8; S_2 и S_1 — сечения каналов на выходе и входе; λ_t — определяется, как для прямолинейных каналов, в зависимости от Δ и Re ; α — половина угла конусности.

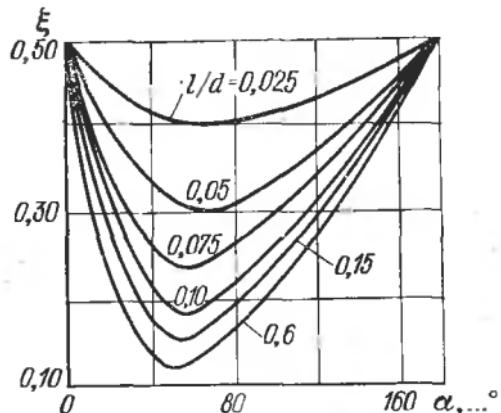


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента ξ от α и l/d

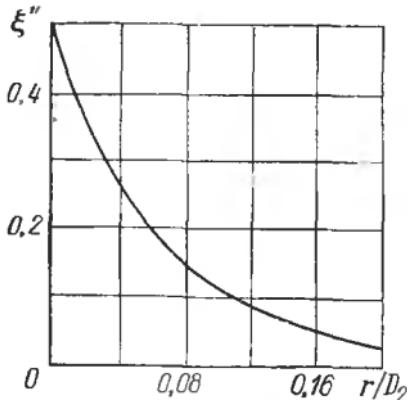


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента ξ'' от r/D_2

Для сжатия потока с закругленной кромкой (рис. 3.7, *г*) при $Re > 10^4$ коэффициент сопротивления

$$\xi = \xi'' (1 - S_2/S_1),$$

где ξ'' определяется по графику рис. 3.9.

Для внезапного сжатия потока (рис. 3.7, *д*) коэффициент сопротивления ξ определяется по табл. 3.6 в зависимости от значения Re и соотношения S_2/S_1 . Здесь $Re = v_2 D_2 / v$.

Кроме сжатия потока возможно расширение потока. Схемы местных сопротивлений совпадают со схемами, показанными на рис. 3.7, *в*, *г* и *д* при направлении потока, обратном указанному на рисунке. В формуле потерь скорость потока учитывают до местного сопротивления, т. е. v_2 .

При внезапном расширении потока по схеме, показанной на рис. 3.7, *в* и *д*, и $Re > 5000$ коэффициент сопротивления ξ определяется формулой

$$\xi = m [1 - (D_2/D_1)^2]^2,$$

где коэффициент m определяется в зависимости от углов конусности:

$\alpha^\circ \dots$	2,5	5	7,5	10	15	20	25	30	40	60	90	180
$m \dots$	0,18	0,13	0,14	0,16	0,27	0,43	0,62	0,81	1,03	1,21	1,12	1,00

Целесообразно принимать значения угла $\alpha < 40^\circ$. Наименьшие потери соответствуют углу $\alpha = 5-6^\circ$. Для случая, показанного на рис. 3.7, *д* $\alpha = 180^\circ$ и $\xi = (1 - S_2/S_1)^2$.

Таблица 3.6. Значения коэффициента ξ
для внезапного сжатия потока

S_2/S_1	Re					
	10	20	30	40	50	10^2
0,1	5,00	3,20	2,40	2,00	1,8	1,30
0,2	5,00	3,10	2,30	1,84	1,62	1,20
0,3	5,00	2,95	2,15	1,70	1,50	1,10
0,4	5,00	2,80	2,00	1,60	1,40	0,90
0,5	5,00	2,70	1,80	1,46	1,30	0,90
0,6	5,00	2,10	1,70	1,35	1,20	0,80

S_2/S_1	Re						
	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	10^3	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	10^4
0,1	1,04	0,82	0,64	0,50	0,80	0,75	0,5
0,2	0,95	0,70	0,50	0,40	0,60	0,6	0,4
0,3	0,85	0,60	0,44	0,30	0,55	0,55	0,35
0,4	0,78	0,50	0,35	0,25	0,45	0,50	0,3
0,5	0,65	0,42	0,30	0,20	0,40	0,42	0,25
0,6	0,56	0,35	0,24	0,15	0,35	0,35	0,2

В изогнутых каналах возникают центробежные силы и вихреобразование у внутренней стенки. Общий коэффициент сопротивления

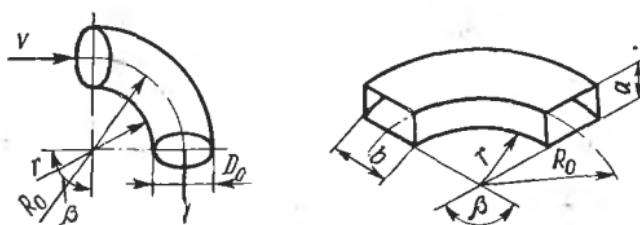


Рис. 3.10. Схемы изогнутих каналов

изгибов и отводов определяется как сумма коэффициентов местного сопротивления поворота канала ξ_m и сопротивления трения ξ_{tr} . Таким образом,

$$\xi = \xi_m + \xi_{tr}.$$

Здесь коэффициент ξ_{tr} вычисляется так же, как для прямых участков. Схемы изогнутих каналов показаны на рис. 3.10. Различают три вида изогнутих каналов.

1. Канал с крутым изгибом при $0,5 < R_0/d_r < 1,5$. Для $0 < \beta < 180^\circ$ и $Re \geq 2 \cdot 10^5$ при гладких стенках

$$\xi_m = ABC,$$

где A определяется по рис. 3.11 в зависимости от угла β ; B — по рис. 3.12 в зависимости от R_0/d_r ; C — по рис. 3.13 в зависимости от

A, A_1, A_2

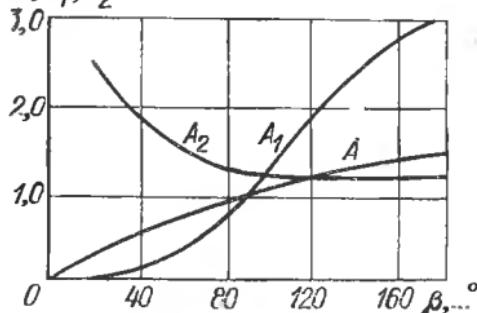


Рис. 3.11. График сомножителей A, A_1 и A_2

B

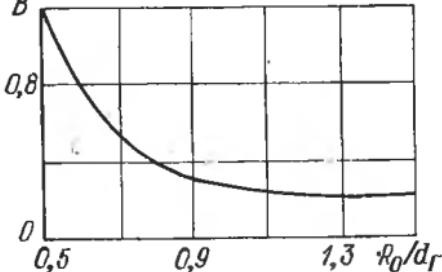


Рис. 3.12. График сомножителя B

a/b для прямоугольного канала (для круглого и квадратного сечений $C = 1,0$);

$$\xi_{tr} = 0,0175 \lambda_t R_0 \beta / d_r,$$

где λ_t определяется так же, как для прямолинейных каналов в зависимости от Re .

C, C_1, C_2

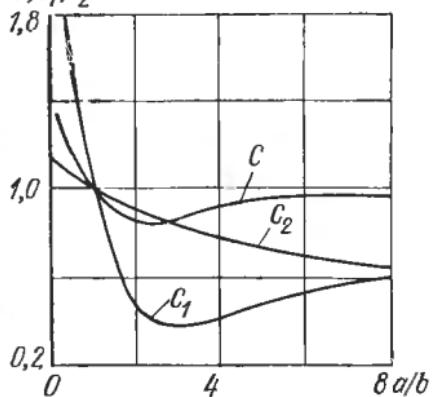


Рис. 3.13. График сомножителей C, C_1 и C_2

B_1

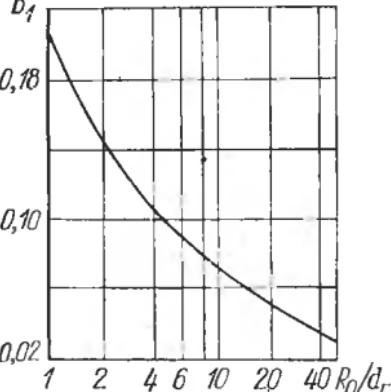


Рис. 3.14. График сомножителя B_1

2. Канал с плавным изгибом при $1,5 < R_0/d_r < 50$. Для $0 < \beta < 180^\circ$ и $Re \geq 2 \cdot 10^5$ при гладких стенках

$$\xi_m = AB_1C_1,$$

где B_1 определяется по рис. 3.14; C_1 — по рис. 3.13; ξ_{tr} определяется так же, как в п. 1.

3. Плавно изогнутые каналы (змеевики) при $R_0/d_r \gg 3,0$. При $50 < Re < 5000$ $\xi = \xi_{tr}$, где коэффициент трения ξ_{tr} определяется так же, как в п. 1, причем

$$\text{при } 50 < Re \sqrt{\frac{d_r}{2R_0}} < 600 \quad \lambda_T = 20 Re^{-0,65} \left(\frac{d_r}{2R_0} \right)^{0,175};$$

$$\text{при } 600 < Re \sqrt{\frac{d_r}{2R_0}} < 1400 \quad \lambda_T = 10,4 Re^{-0,55} \left(\frac{d_r}{2R_0} \right)^{0,225};$$

$$\text{при } 1400 < Re \sqrt{\frac{d_r}{2R_0}} < 5000 \quad \lambda_T = 5 Re^{-0,45} \left(\frac{d_r}{2R_0} \right)^{0,275}.$$

Для изгиба канала в виде колена с острыми кромками на повороте ($r = 0$) при углах поворота $0 < \beta \leq 180^\circ$ и $Re \geq 4 \cdot 10^4$ для гладких стенок

$$\xi = \xi_m = A_1 A_2 C_2,$$

где A_1 и A_2 определяются по рис. 3.11; C_2 — по рис. 3.13.

3.5

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СММ

Эксплуатационные качества экранированных СММ определяются следующими характеристиками.

1. Электромагнитные СММ характеризуются:

1) зависимостью максимального момента от тока возбуждения и частоты вращения $M_{s.m} = f(I_b; n)$ или максимальной силы от тока возбуждения и скорости перемещения $F_{em} = f(I_b; v)$;

2) зависимостью статического момента или силы от сдвига зубцов механизма $M = f(\gamma)$, $F = f(x_0)$;

3) зависимостью потерь в экране от тока возбуждения и частоты вращения $P_\vartheta = f(I_b; n)$ или скорости перемещения $P_\vartheta = f(I_b; v)$;

4) зависимостью выходного момента и мощности от тока возбуждения и частоты вращения $M_{вых} = f(I_b; n)$, $P_{вых} = f(I_b; n)$ или выходной силы от тока возбуждения и скорости перемещения $F_{вых} = f(I_b; v)$;

5) зависимостью к. п. д. от тока возбуждения и частоты вращения $\eta = f(I_b; n)$ или скорости перемещения $\eta = f(I_b; v)$.

2. Магнитные СМ. Для них строятся те же характеристики, что и для электромагнитных, но только в зависимости от частоты вращения или скорости перемещения.

Для построения характеристик систем с электромагнитным возбуждением необходимо вначале рассчитать зависимость тока возбуждения и индукции в зазоре $B_{z\delta} = f(I_b)$. Она определяется из условия равенства н. с. обмотки возбуждения сумме н. с. по участкам магнитной цепи, т. е. $\Sigma F = mF_{\delta p} + mF_{\delta k} + F_a$. Здесь

$$\sum F = I_b w; \quad F_{\delta p} = 0,8 \cdot 10^6 \delta B_{z\delta}; \quad F_{\delta k} = 0,8 \cdot 10^6 \delta' B_{\delta k};$$

$$F_a = H_a l_a.$$

Затем следует выразить величины $B_{\delta k}$ и H_a через значения $B_{z\delta}$. Это можно сделать из условия равенства магнитного потока в воздушном зазоре и на всех участках магнитной цепи (с учетом потоков рассеяния). Кривая намагничивания стали магнитопровода при этом аппроксимируется выражением

$$H_a = a_h \operatorname{sh} (b_h B_a),$$

где H_a — напряженность, А/м; B_a — индукция в стали, Т; a_h — числовой коэффициент, А/м; b_h — числовой коэффициент, 1/Т.

Значения a_h и b_h определяются по рабочему участку кривой намагничивания стали. Для этого выбираются две точки на кривой намагничивания, через которые должна пройти аппроксимирующую кривую (чаще всего 1 Т и 1,5 Т). Подставив значения напряженности и индукции в уравнение аппроксимирующей кривой, получим систему двух уравнений, из которой и определятся значения a_h и b_h . Так, например, для литой стали (сталь 10) значения коэффициентов $a_h = 38,4$; $b_h = 3,41$.

Проведя соответствующие преобразования, получаем уравнение, в правой части которого н. с. системы выражена в зависимости от $B_{z\delta}$, а в левой — ток возбуждения. Задавая значения $B_{z\delta}$ от нуля до 1,3 номинального значения, принятого при расчете, определяют соответствующие им значения тока возбуждения.

Рассмотрим в качестве примера определение зависимости $I_b = f(B_{z\delta})$ для муфты, схема которой приведена на рис. 2.38. Конструктивные размеры системы здесь и в дальнейшем берутся из расчетов СММ.

Индукция в конструктивном зазоре

$$B_{\delta k} = \frac{\Phi_0 \sigma}{\lambda D' l_k} = \frac{k_\Phi b_z l z \sigma}{\pi D' l_k} B_{z\delta} = \frac{a_1 \sigma}{\pi D' l_k} B_{z\delta} = a_2 B_{z\delta},$$

где l_k — длина магнитопровода в конструктивном зазоре;

$$a_1 = k_\Phi b_z l z; \quad a_2 = \frac{a_1 \sigma}{\pi D' l_k}.$$

Индукция в стали

$$B_a = \Phi_0 \sigma / S_a = a_1 \sigma B_{z\delta} / S_a.$$

Напряженность в стали с учетом аппроксимации

$$H_a = a_h \operatorname{sh} \left(b_h \frac{a_1 \sigma}{S_a} B_{z\delta} \right).$$

С учетом полученных соотношений

$$I_b = -\frac{1}{w} \left[0,8 \cdot 10^6 m B_{z\delta} (\delta + \delta' a_2) + l_a a_h \operatorname{sh} \left(b_h \frac{a_1 \sigma}{S_a} B_{z\delta} \right) \right].$$

Это позволяет построить зависимость $B_{z\delta} = f(I_b)$.

Для одноименно-полюсных реактивных экранированных муфт (см. п. 2.1) зависимость максимального момента от индукции определяется выражением

$$M_{\max} = 0,5 \pi D^2 l_m K B_{z\delta}^2 / \mu_2.$$

Так как функция $K = Q - N/2$, а N зависит от величины Δ , т. е. от частоты вращения, то следует определить $N = f(n)$. При заданных значениях δ , a и t функция $N = N^*n$, где N^* определяется как

$$N^* = N'(a/\delta)/n_1.$$

Здесь N' — значение функции по рис. 2.4, a , определенное по расчетному значению δ/t для принятого значения δ/Δ ; n_1 — значение частоты вращения, соответствующей принятому значению δ/Δ ,

$$n_1 = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{60}{\pi z \mu_3 \gamma_3 \delta^2}.$$

Таким образом,

$$M_{\text{эм}} = 0,5\pi D^2 lm(Q - 0,5N^*n) B_{z\delta}^2 / \mu_3.$$

Зависимость статического момента от сдвига зубцов определяется по формуле

$$M = M_{\text{эм}} \sin(0,5z\gamma/k_{b2}).$$

Здесь γ — пространственный угол рассогласования полумуфт.

Зависимость потерь в экране от частоты вращения (об/мин) и тока возбуждения (A) для одноименно-полюсных муфт определяется формулой

$$P_3 = \pi D_{\text{ср.з}} lm \frac{z\tau}{60\mu_3} N^* B_{z\delta}^2 n^2.$$

Момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$) на выходе муфты

$$M_{\text{вых}} = M_{\text{эм}} - 4,78P_3/n.$$

Мощность (Вт) на выходе муфты

$$P_{\text{вых}} = M_{\text{вых}} n / 9,56.$$

Коэффициент полезного действия механизма определяется отношением

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вых}} + P_3 + P_B + P_{\text{мех}} + P_{\text{щ.з}}},$$

где P_B — мощность, потребляемая обмоткой возбуждения (см. п. 2.9), $P_B = U_B I_B$; $P_{\text{щ.з}}$ — потери мощности в контактном токоподводе (на контактных кольцах), $P_{\text{щ.з}} = \Delta U_{\text{щ}} I_B$; $\Delta U_{\text{щ}}$ — переходное падение напряжения на пару щеток, B , определяется по данным щеток; $P_{\text{мех}}$ — механические потери в СММ. Механические потери включают в себя потери на трение в подшипниках $P_{\text{п}}$, вентиляционные $P_{\text{вент}}$, на трение щеток по контактным кольцам $P_{\text{щ.т}}$. Если токопровод бесконтактный, то $P_{\text{щ.з}} = 0$, как и $P_{\text{щ.т}}$.

Потери на трение щеток по контактным кольцам, Вт ,

$$P_{\text{щ.т}} = k_t p_{\text{щ}} v_{\text{щ}} S_{\text{щ}},$$

где k_t — коэффициент трения щеток, $k_t = 0,2 \div 0,3$; $p_{\text{щ}}$ — удельное давление щеток на кольца, Па, в СММ общего применения $p_{\text{щ}} =$

$= (2 \div 3) 10^4$ Па, в транспортных СММ $p_{\text{щ}} = (2 \div 9) 10^4$ Па; $v_{\text{щ}}$ — скорость колец относительно щеток, м/с, $v_{\text{щ}} = \pi D_{\text{k}} n / 60$; D_{k} — диаметр контактного кольца, м; $S_{\text{щ}}$ — суммарная площадь контактной поверхности щеток, м².

Потери (Вт) в подшипниках качения могут быть рассчитаны по формуле

$$P_{\text{n}} = \mu G v_{\text{щ}},$$

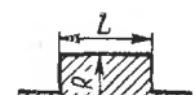
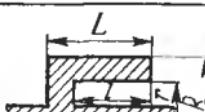
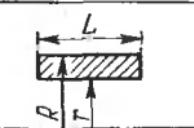
где G — нагрузка на подшипник, Н; μ — коэффициент трения, для шариковых подшипников $\mu \approx 0,001 \div 0,002$, для роликовых подшипников $\mu \approx 0,002 \div 0,003$ (см. гл. 4); $v_{\text{щ}}$ — окружная скорость шейки вала в подшипнике, м/с, $v_{\text{щ}} = \pi D_{\text{щ}} n / 60$; $D_{\text{щ}}$ — диаметр шейки вала.

Вентиляционные потери (Вт) $P_{\text{вент}}$ равны сумме мощности, отбираемой от ведущего вала (при самовентиляции) или потребляемой вентилятором (см. п. 3.3), и потеря трения об окружающую среду подвижных элементов СММ. Потери трения о воздух вращающихся деталей определяются упрощенным выражением

$$P_{\text{вент}} = 27,5 \cdot 10^{-5} n^3 K_a,$$

где n — частота вращения, об/мин; K_a — геометрический фактор, определяемый формой и размерами вращающихся частей СММ, м⁵. Значения K_a приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Значения фактора K_a

Вид сечения ротора	K_a
	$LR^4 + 0,4R^5$
	$LR^4 [1 + (l/L)(r/R)^4] + 0,4R^5$
	$LR^4 [1 + (r/R)^4] + 0,4R^5 [1 - (r/R)^5]$

При вращении полумуфты в жидкости зубцовые элементы закрываются рубашкой для уменьшения трения. Потери трения в щели между экраном и полумуфтой могут быть рассчитаны по формуле

$$P_{\text{в.г}} = 0,0687 \mu_{\text{г}} r^3 n^2 / \delta',$$

где l — длина полумуфты, м; $\mu_{\text{г}}$ — динамический коэффициент вязкости жидкости, Н·с/м²; r — средний радиус по зазору, м; δ' — зазор между экраном и полумуфтой, м.

Характеристики магнитных одноименно-полюсных реактивных экранированных муфт рассчитываются при заданном значении индукции в зазоре $B_{z\delta}$. Зависимости $M_{\text{эм}} = f(n)$, $M_{\text{эм}} = f(\gamma)$, $P_{\text{вых}} = f(n)$, $M_{\text{вых}} = f(n)$ и $P_{\text{вых}} = f(n)$ строятся по формулам, приведенным выше.

Коэффициент полезного действия определяется зависимостью

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вых}} + P_{\text{в}} \pm P_{\text{мех}}},$$

причем $P_{\text{мех}} = P_{\text{п}} + P_{\text{вент}}$.

Характеристики магнитных переменно-полюсных активных экранированных муфт также рассчитываются при заданном значении индукции в зазоре (см. п. 2.5). Зависимость статического момента от сдвига зубцов выражается формулой

$$M = M_{\text{эм}} \sin (\gamma p),$$

где p — число пар полюсов.

Зависимость потерь в экране (Вт) от частоты вращения определяется выражением

$$P_{\text{в}} = \left(\frac{B_{\delta} l D_{\text{эм.ср}} \pi}{30} \right)^2 \frac{2 p \gamma_{\text{эм}} b a}{4l + (4 + \pi) b} n^2.$$

Размеры и параметры муфты приведены в расчете муфты.

Зависимости $M_{\text{вых}} = f(n)$ и $P_{\text{вых}} = f(n)$, а также η рассчитываются аналогично характеристикам одноименно-полюсной магнитной муфты.

При расчете характеристик экранированных одноименно-полюсных механизмов поступательного перемещения (см. п. 2.2) зависимость передаваемой силы (H) от индукции и скорости перемещения определяется формулой

$$F_{\text{эм}} = 7,98 \cdot 10^5 m U_1 B_{z\delta}^2 (Q - 0,5 N^* v).$$

Здесь $N^* = N' (a/\delta)/v_1$, где N' — значение функции по рис. 2.4, a , определенное по расчетному значению δ/τ для некоторого принятого значения δ/Δ ; v_1 — значение скорости перемещения, соответствующее принятому значению δ/Δ , м/с,

$$v_1 = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right)^2 \frac{\tau}{\delta^2} \frac{1}{\pi \mu_{\text{эм}} \gamma_{\text{эм}}}.$$

Зависимость статической силы от сдвига зубцов выражается в виде

$$F = F_{\text{эм}} \sin (x_0 180^\circ / b_z),$$

где x_0 — линейный сдвиг частей механизма.

Потери в экране (Вт) определяются формулой

$$P_{\text{в}} = U_1 m N^* v^2 B_{z\delta}^2 / \mu_{\text{эм}}.$$

Тормозная сила (Н) экрана

$$F_3 = U_1 m N^* v B_z^2 / \mu_3.$$

Сила (Н) на выходе механизма $F_{\text{вых}} = F_{\text{эм}} - 0,5F_3$. Мощность (Вт) $P_{\text{вых}} = F_{\text{вых}}v$. Механические потери и к. п.д. определяются в зависимости от вида механизма по формулам, приведенным выше.

При расчете характеристик механизмов с магнитами из феррита бария или РЗМ принимается, что $M_{\text{эм}}$ не зависит от частоты вращения или скорости перемещения элементов (см. п. 2.6).

Зависимость момента и силы от сдвига записывается в виде:

$$M = M_{\text{эм}} \sin(p\gamma); \quad F = F_{\text{эм}} \sin(x_0 180^\circ/\tau).$$

Потери в экране (Вт):
для цилиндрической муфты

$$P_3 = \left(\frac{\pi D_{\text{эм}, \text{ср}} l B_d}{30} \right)^2 \frac{\gamma_3 \tau p a}{4l + \pi \tau} n^2;$$

для торцовой муфты

$$P_3 = 1,93 \cdot 10^{-4} \rho B_d^2 D_2^3 \gamma_3 a \tau \frac{1}{0,5 - 3\pi^2/(10p)} n^2;$$

для плоского поступательного механизма

$$P_3 = 4B_d^2 l^2 \frac{\gamma_3 a \tau p}{4l + \pi \tau} v^2.$$

Момент и мощность на выходе муфт вращения определяются формулами:

$$M_{\text{вых}} = M_{\text{эм}} - 4,78 P_3 / n; \quad P_{\text{вых}} = M_{\text{вых}} n / 9,56.$$

Тормозная сила экрана в механизме поступательного перемещения $F_3 = P_3/v$, сила и мощность на выходе механизма $F_{\text{вых}} = F_{\text{эм}} - 0,5F_3$, $P_{\text{вых}} = F_{\text{вых}}v$. Определение механических потерь и к. п. д. производится, как указано выше.

При расчете характеристик магнитно-гистерезисных экранированных муфт (см. п. 2.7) зависимости $M_{\text{эм}} = f(n)$ и $M = f(\gamma)$ не строятся. Потери в экране определяются формулой

$$P_3 = \left[\frac{B_r l (D_1 + a) \pi}{30} \right]^2 \frac{2\rho\gamma_3 b a}{4l + (4 + \pi) b} n^2.$$

Характеристики $M_{\text{вых}} = f(n)$, $P_{\text{вых}} = f(n)$ и $\eta = f(n)$ строятся аналогично характеристикам одноименно-полюсной реактивной экранированной муфты.

Для неэкранированных СММ характерно постоянство передаваемого момента или силы, не зависящих от частоты вращения или скоро-

сти перемещения. Однако механические потери изменяются с изменением частоты вращения или скорости перемещения. Поэтому для неэкранированных магнитных систем строят зависимость $\eta = f(n)$, учитывая лишь механические потери. Для неэкранированных электромагнитных СММ определяется зависимость $B_{z\delta} = f(I_B)$, а затем строятся зависимости $M_{\text{эм}} = f(I_B)$ и $\eta = f(I_B, n)$ или $F_{\text{эм}} = f(I_B)$ и $\eta = f(I_B, v)$, причем при расчете η учитывается зависимость механических потерь от n или v .

3.6

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ФЛАНЦЕВ ЭКРАНИРОВАННЫХ СММ

В экранированном исполнении СММ имеют фланцы, с помощью которых магнитные механизмы устанавливают на герметичные устройства. При наличии давления или разрежения под экраном при диаметре экрана до 400 мм фланцы СММ должны быть выполнены соответственно ГОСТу (см. гл. 6). При больших, чем 400 мм, диаметрах экрана необходим расчет фланцев на прочность.

Конструктивно фланцы могут выполняться за одно целое с герметичной оболочкой (экраном), быть приваренными к цилиндрической части оболочки или надеваться на нее (накидные фланцы). Конструкции фланцев приведены на рис. 3.15—3.17. Приварные фланцы, показанные на рис. 3.15, используют при давлении до 30,0 МПа и температуре до 500° С, плоские и накидные фланцы, показанные на рис. 3.16 и 3.17, — до 1,6 МПа и температуре до 300° С. Соотношения размеров фланцев, рекомендуемые ОСТ 26-373—71, приведены в табл. 3.8. Диаметры болтов или шпилек и шаг их установки принимают по данным в табл. 3.9, 3.10 и 3.11 в зависимости от размера фланца и давления. Выбор материала прокладок и их размеров может быть произведен по табл. 3.12 и 3.13. Расчет прочности фланцев сведен в табл. 3.14. Ряд коэффициентов и величин, необходимых для расчета размеров фланцев, определяется по рис. 3.18—3.25. Размеры фланцев определяются в соответствии с рабочим давлением. Если оно менее 0,6 МПа, расчет ведется для давления 0,6 МПа. В табл. 3.15 приведены значения вспомогательного коэффициента α , необходимого для расчета нагрузки болтов.

Допускаемые напряжения металла болтов и фланцев зависят от расчетной температуры. Расчетная температура фланцев и болтов принимается в соответствии с типом фланца. Для фланцев, показанных на рис. 3.15 и 3.16, рабочая температура фланцев является и расчетной, для болтов расчетная температура принимается 0,95 от рабочей. Для фланцев, показанных на рис. 3.17, расчетная температура для фланцев принимается 0,97 от рабочей, для болтов — 0,9 от рабочей.

Допускаемые напряжения для болтов приведены в табл. 3.16. Для материалов, не указанных в табл. 3.16, допускаемые напряжения определяются по методике, приведенной ниже. Если расчетная температура болтов или шпилек не более 380° С для углеродистых сталей, 420° С для низкоуглеродистых сталей и 525° С для аустенитных сталей, то допускаемое напряжение определяется зависимостью $\sigma_{\text{доп}} \leq \sigma_t / n_t$, где σ_t — предел текучести материала при расчетной температуре; n_t — коэффициент запаса прочности по пределу текучести, определяемый по табл. 3.17.

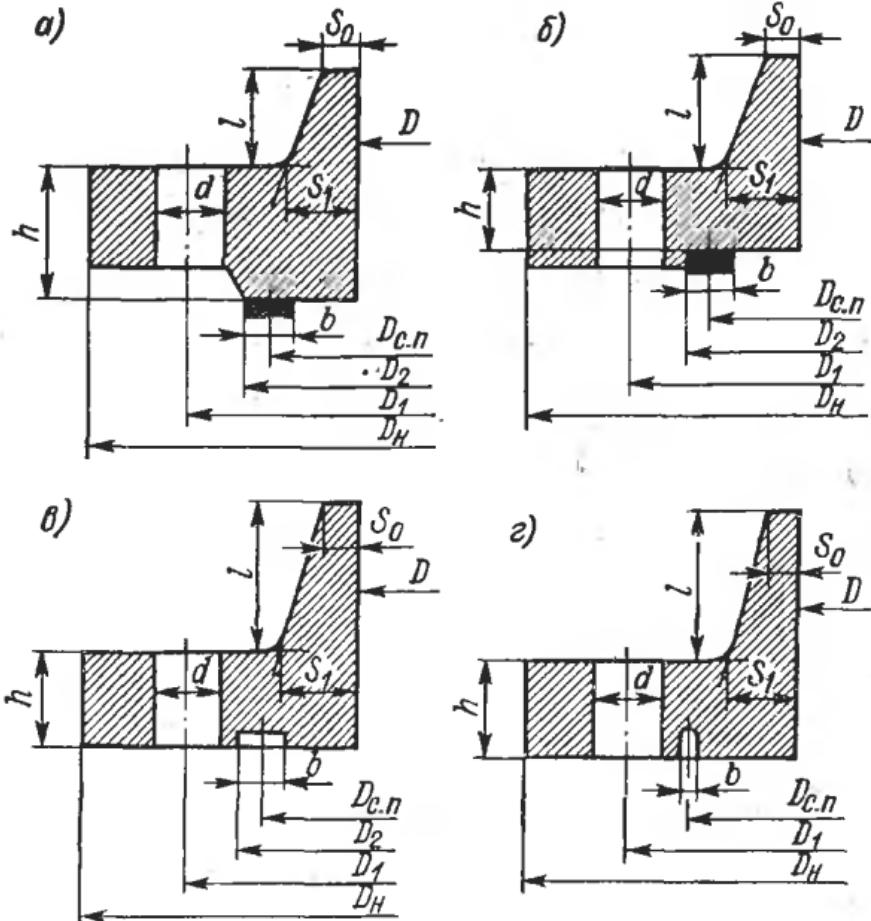


Рис. 3.15. Конструкции фланцев, приваренных встык:
 а — с гладкой уплотнительной поверхностью; б — с уплотнительной поверхностью выступ—впадина; в — с уплотнительной поверхностью с пазом; г — с уплотнительной поверхностью под металлическую прокладку овального или восьмиугольного сечений

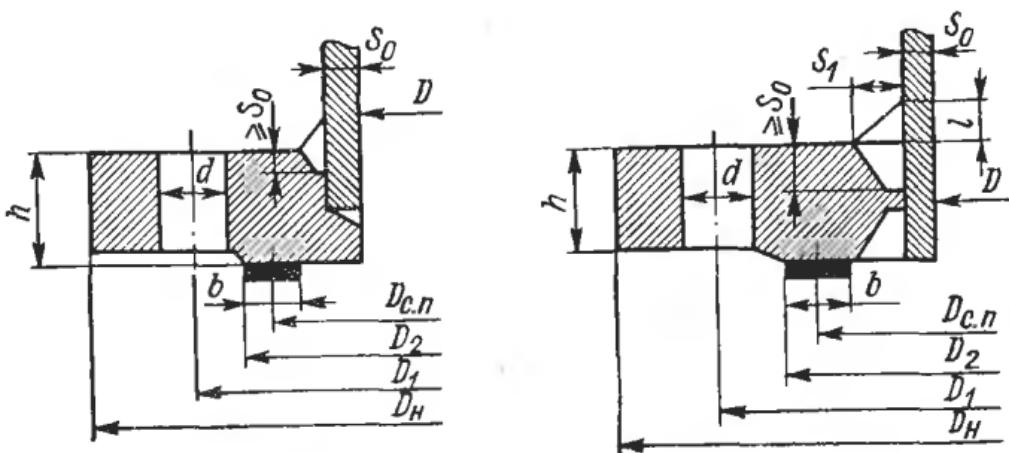


Рис. 3.16. Конструкции плоских фланцев

Таблица 3.8. Соотношения размеров фланцев

Размер, м	Тип фланца			Примечания
	по рис. 3.15	по рис. 3.16	по рис. 3.17	
S_0	$S \leq S_0 \leq 1,3S_{\text{но}}$ $S_0 - S \leq 0,05\text{м}$		$S \leq S_0$	S — толщина экрана, к которой приваривается фланец
S_1	$S_1 = \beta S_0$	—	—	Коэффициент β определяется по рис. 3.18
l	$l \geq \frac{1}{i} \times$ $\times (S_1 - S_0)$	—	—	$i = 1/3$ — уклон втулки
D_1	$D_1 \geq D +$ $+ 2(S_1 + d +$ $+ 0,006)$	$D_1 \geq D +$ $+ 2(2S_0 +$ $+ d + 0,006)$	$D_1 \geq D_2 + 2 \times$ $(d + 0,008)$	d принимается по табл. 3.10
$D_{\text{н}}$	$D_{\text{н}} \geq D_1 + a$			a принимается по табл. 3.10
D_2	$D_2 \leq D_1 - l_1$		$D_3 \leq D_2$	l_1 принимается по табл. 3.10
$D_{\text{с. п}}$	$D_{\text{с. п}} = D_2 - b$		$D_{\text{с. п}} = D_3 - b$	b принимается по табл. 3.12
Число болтов n	$n \geq \frac{\pi D_1}{t_{\Phi}}$			t_{Φ} принимается по табл. 3.14
h	$h = \lambda_1 \sqrt{DS_9}$		—	λ_1 принимается по рис. 3.19; S_9 — по рис. 3.20

При более высоких расчетных температурах допускаемое напряжение берется по меньшему из значений:

$$\sigma_{\text{доп}} = \sigma_t / n_t; \quad \sigma_{\text{доп}} = \sigma_d / n_d; \quad \sigma_{\text{доп}} = \sigma_n / n_n,$$

где σ_d — предел длительной прочности за 100 тыс. ч при расчетной температуре, МПа; n_d — запас по пределу длительной прочности, $n_d = 1,8$; σ_n — среднее значение 1% предела ползучести за 100 тыс. ч, МПа; n_n — запас прочности по пределу ползучести, $n_n = 1,1$. Для учета начального затяга величина $\sigma_{\text{доп}}$ увеличивается на 10%.

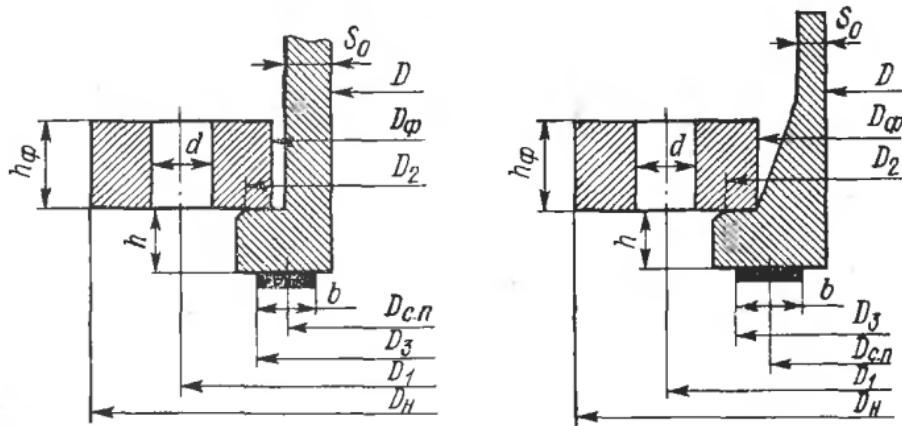


Рис. 3.17. Конструкции свободных (накидных) фланцев

Таблица 3.9. Рекомендуемые диаметры болтов (шпилек), мм, в зависимости от давления p и диаметра D

p , МПа	Диаметр D , м										
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	$\geq 2,4$		
До 0,6	M20							M24—M30			
1,0	M20				M30				—		
1,6	M20		M24—M30				M30				
2,5	M20		M24—M30			M30					
4,0	M30		M36			M42					
6,4	M36	M42		M48		M52					
8,0	M30—M36	M42	M48	M52—M56	—						
10,0	M30—M42	M48	M52—M56	M56—M64	—						

Таблица 3.10. Размеры фланцев и болтов в зависимости от диаметра резьбы

Размеры	Диаметр болта d_6 , мм											
	M20	M22	M24	M27	M30	M36	M42	M48	M52	M56	M60	M64
Площадь поперечного сечения болта по внутреннему диаметру резьбы $f_6 \cdot 10^4$, м ²	2,36	2,95	3,40	4,45	5,40	7,90	10,90	14,40	15,20	19,65	23,00	26,00
Диаметр отверстия под болт $d \cdot 10^2$, м	2,40	2,60	2,80	3,00	3,30	3,90	4,50	5,20	5,60	6,00	6,60	7,00
Размер фланца * $a \cdot 10^2$, м: для гаек шестигранных для гаек шестигранных с уменьшенным разме- ром под ключ	4,00 3,60	4,20 4,00	4,70 4,20	5,20 4,70	5,80 5,20	6,90 6,30	8,00 6,30	9,20 8,00	9,70 8,60	11,00 —	11,50 —	12,00 —
Размер фланца * $l_1 \cdot 10^2$, м: для плоских прокладок для прокладок овального или восьмиугольного се- чения	3,00 5,30	3,20 5,50	3,40 5,70	3,70 6,00	4,10 6,40	4,80 7,10	5,50 7,80	6,10 8,40	6,50 8,80	— 19,50	— 24,00	— 24,00

* Размеры определяются по формулам, приведенным в табл. 3.8.

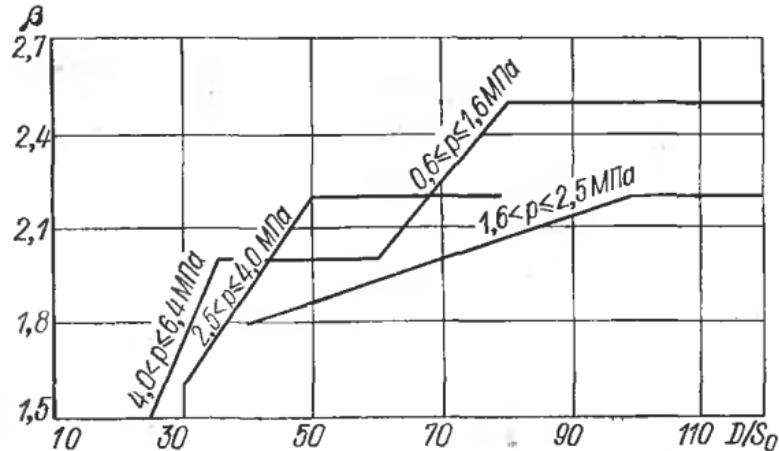


Рис. 3.18. Зависимость коэффициента β от D/S_0

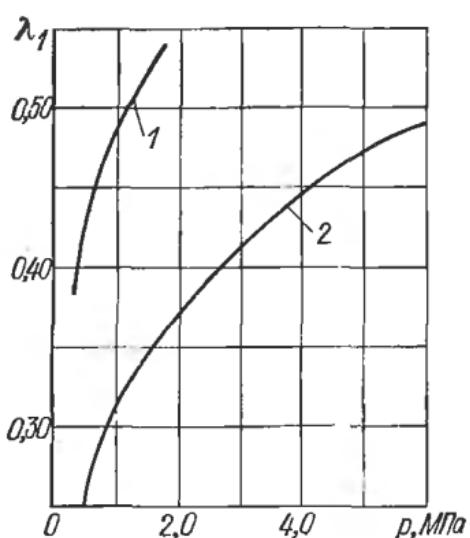


Рис. 3.19. Коэффициент λ_1 :

1 — для плоских фланцев; 2 — для фланцев, приваренныхстык

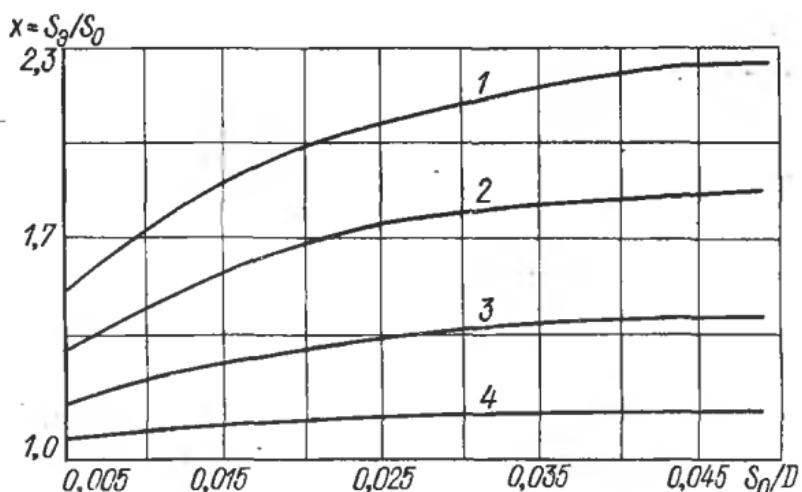


Рис. 3.20. График для определения S_3 при $i = 1/3$:

1 — $\beta = 3$; 2 — $\beta = 2.5$; 3 — $\beta = 2.0$; 4 — $\beta = 1.5$

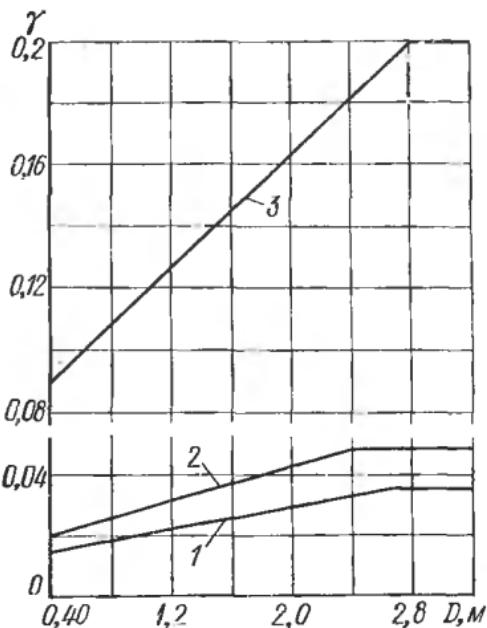


Рис. 3.21. Коеффициент γ :

1 — для плоских фланцев при $p \leq 0,6$ МПа; 2 — для плоских фланцев при $p \leq 1,6$ МПа; 3 — для приваренных фланцев при $p \leq 1,6$ МПа

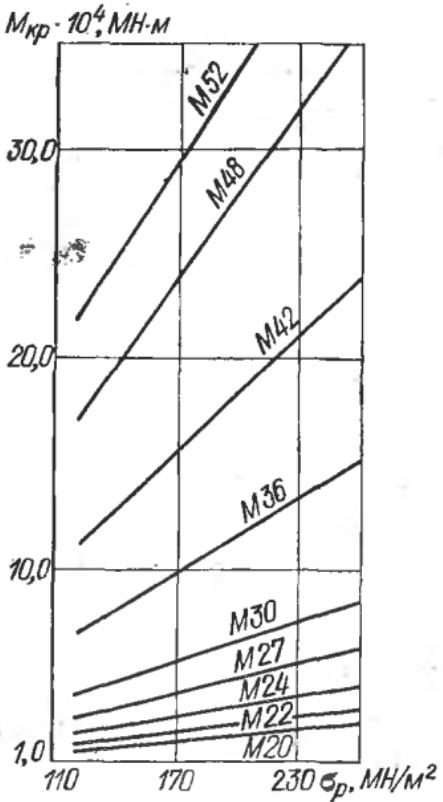


Рис. 3.22. График для определения M_{kp} (значения даны для болтов без смазки, при смазке болтов значения M_{kp} уменьшить на 25%)

Рис. 3.23. Зависимость коэффициента Ψ_1 от D_h/D или от D_2/D (D_2/D — для накидных фланцев)

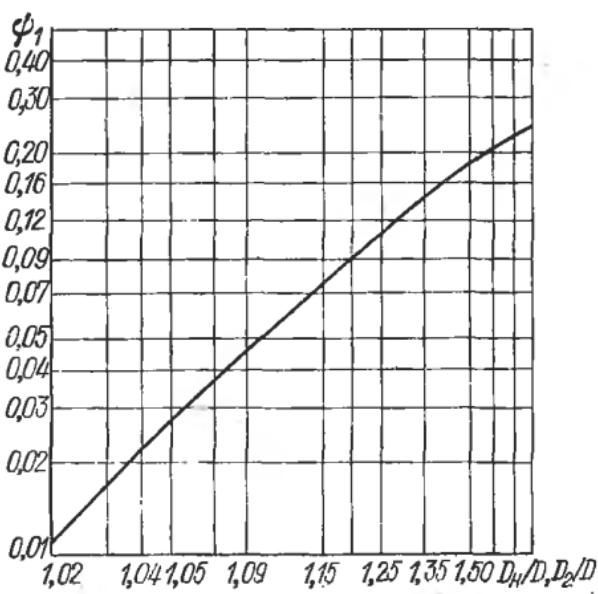


Таблица 3.11. Рекомендуемый шаг установки болтов

Давление p , МПа	Шаг t_b , м	Давление p , МПа	Шаг t_b , м
До 0,3	$(4,2 \div 5) d$	2,5	$(2,7 \div 3,5) d$
0,6	$(3,8 \div 4,8) d$	4,0	$(2,3 \div 3,0) d$
1,0	$(3,5 \div 4,2) d$	4,0—10,0	$(2,1 \div 2,8) d$
1,6	$(3,0 \div 3,8) d$		

Таблица 3.12. Размеры прокладок

Прокладка	Диаметр D , м	Ширина прокладки $b \cdot 10^2$, м
Плоская неметаллическая	$D \leq 1,0$ $1,0 < D \leq 2,0$ $D > 2,0$	1,2—1,5 1,5—2,5 2,5
Плоская металлическая	$D \leq 1,6$ $D > 1,6$	1,2—1,8 1,3—2,5
Плоская в металлической оболочке и зубчатая металлическая	$D \leq 1,6$ $D > 1,6$	1,2—1,8 1,3—2,5
Овальная или восьмиугольная для $p \geq 6,4$ МПа	$D \leq 0,6$ $0,6 < D \leq 0,8$ $0,8 < D \leq 1,0$ $1,0 < D \leq 1,6$	1,2—1,8 1,6—2,2 1,8—2,8 2,2—4,2

П р и м е ч а н и е. Расчетная ширина плоской прокладки: $b_0 = 0,5b$ при $b \leq 0,015$ м; $b_0 = 0,6\sqrt{b}$ при $b > 0,015$ м, а овальной или восьмиугольной $b_0 = b/8$.

Таблица 3.13. Уплотняющие прокладки

Прокладка	Материал прокладки	Коэффициент m	Минимальное давление прокладки g , МПа	Допускаемое давление $[g]$, МПа
Плоская неметаллическая	Резина по ГОСТ 7338—77 с твердостью по Шору: до 75 свыше 75 Картон асбестовый по ГОСТ 2850—75 при толщине 3 мм Паронит по ГОСТ 481—71 при толщине ≥ 1 мм Фторопласт-4 по ГОСТ 10007—72 при толщине до 3 мм	0,5 1 2,5 2,5 2,5	2,0 4,0 $20,0 + p$ $20 + p$ 10,0	18,0 20,0 130,0 130,0 40,0
Плоская металлическая	Алюминий АД по ГОСТ 13722—68 Латунь Л63 по ГОСТ 2208—75 Сталь 05kp по ГОСТ 1050—74 Сталь 0Х13 по ГОСТ 5632—72 Сталь 0Х18Н10Т по ГОСТ 5632—72	4 4,75 5,5 5,5 6,5	60,0 90,0 125,0 125,0 180,0	—
Плоская асbestosвая в металлической оболочке толщиной 0,2—0,3 мм	Асбест по ГОСТ 2850—75, оболочка: из алюминия из меди или латуни из стали 05kp из стали типа Х18Н10Т	3,25 3,5 3,75 3,75	38,0 46,0 53,0 63,0	—
Металлическая овального или восьмигранного сечения	Сталь 05kp по ГОСТ 1050—74 Сталь 0Х13 по ГОСТ 5632—72 Сталь 0Х18Н10Т по ГОСТ 5632—72	5,5 5,5 6,5	125,0 125,0 180,0	—

При мечани е. Для сред с высокой проникающей способностью (водород, гелий, легкие нефтепродукты, сжиженные газы и т. п.) $g = 35,0$ МПа.

Таблица 3.14. Расчет прочности фланцев

Параметр	Конструкция фланцев		
	по рис. 3.15	по рис. 3.16	по рис. 3.17
Равнодействующая внутреннего давления Q_d , МН	$Q_d = 0,785 D_{c.p}^2 p,$ где $D_{c.p}$ — средний диаметр прокладки; p — расчетное давление, МПа		
Нагрузка от прокладки в рабочих условиях R_p , МН	$R_p = 2\pi D_{c.p} b_0 m p,$ где b_0 — см. табл. 3.12; m — см. табл. 3.13		
Усилия из-за разности температуры фланцев и болтов при эксплуатации Q_t , МН	$Q_t = \gamma n f'_6 E_6 t_\phi (\alpha_\phi - \alpha_b k_1)$	$Q_t = 0,97 \gamma n f'_6 E_6 t_\phi \times$ $\times (\alpha_\phi - \alpha_b k_1)$	
Нагрузка от болтов в условиях монтажа P_{61} , МП	<p>В этих формулах γ — см. рис. 3.21; для фланцев по рис. 3.15 при $p \leq 2,5$ МПа $\gamma = 0,2$, $p \leq 4,0$ МПа $\gamma = 0,25$, $p \leq 6,4$ МПа $\gamma = 0,3$; n — число болтов (шпилек); f_6 — площадь поперечного сечения болта по внутреннему диаметру резьбы (см. табл. 3.10), для шпилек $f'_6 = f_6$, для болтов $f'_6 = 0,785 d_6^2$; E_6 — модуль упругости материала болта или шпильки, МПа; t_ϕ — шаг установки болтов, $t_\phi \leq t_6$ (см. табл. 3.11); α_ϕ и α_b — коэффициенты линейного расширения материалов фланца и болтов; k_1 — коэффициент, $k_1 = t_6/t_\phi$</p> <p>Принимается большее из значений, рассчитанных по формулам:</p> $P_{61} = \xi (\alpha Q_d + R_p) + 4M/D_{c.p}; P_{61} = \pi b_0 D_{c.p} g,$ <p>где α — см. табл. 3.15; $\xi = \sigma_{\text{доп 20}}/\sigma_{\text{доп } t}$, где значения $\sigma_{\text{доп}}$ приняты по</p>		

табл. 3.16 или рассчитаны; M — внешний изгибающий момент, МН·м; b_0 — см. табл. 3.12; g — см. табл. 3.13. Необходимо, чтобы $P_{61} \geq n f_6 \sigma_b$, где σ_b — меньшее значение напряжения из величин $0,4\sigma_{\text{доп. 20}}$ и $110,0 \text{ МН}/\text{м}^2$

Нагрузка от болтов в рабочих условиях P_{62} , МН	$P_{62} = Q_d + R_n + Q_t + 4M/D_{c, n}$
Условия прочности болтов	$\sigma_p = P_{61}/(n f_6) \leq \sigma_{\text{доп. 20}}; \sigma_p = P_{62}/(n f_6) \leq \sigma_{\text{доп. } t}$
Крутящий момент при затяжке болтов M_{kp} , МН·м	См. рис. 3.22
Условие прочности прокладок из паронита или фторопласта	$g = \frac{P_{61}}{\pi D_{c, n} b_0} \leq [g],$ где $[g]$ — см. табл. 3.13
Приведенный изгибающий момент M_0 , МН·м	<p>Принимается большее из значений, рассчитанных по формулам:</p> $M_{01} = 0,5P_{61}(D_1 - D_{c, n});$ $M_{02} = 0,5 [P_{62}(D_1 - D_{c, n}) + Q_d(D_{c, n} - D - S_9)] \sigma_{\text{доп. 20}}/\sigma_{\text{доп. } t}$ <p>В этих формулах S_9 — эквивалентная толщина втулки, $S_9 = xS_0$; x — см. рис. 3.20. Для фланцев по рис. 3.16 $x = 1$</p>
Максимальное напряжение σ во втулке фланца или бурта, МПа	<p>В сечении S_1 $\sigma_1 = 1,9M_0\omega/[D(S_1 - c)^2]$</p> <p>В сечении S_0 $\sigma_0 = f\sigma_1$, где $\omega = 1/[1 + 0,9\lambda(1 + \Psi_1\gamma_1^2)]$; $\lambda = h/V\bar{D}\xi$; $\gamma_1 = h/S_9$; Ψ_1 — см. рис. 3.23; f — см. рис. 3.24, $f \geq 1,0$; c — величина увеличения толщины втулки, учитывающая коррозию.</p>

Параметр	Конструкция фланцев		
	по рис. 3.15	по рис. 3.16	по рис. 3.17
Окружное напряжение в кольце фланца σ_k , МПа	$\sigma_k = M_0 [1 - \omega (1 + 0,9\lambda)] \Psi_2 / (Dh^2)$ Здесь Ψ_2 определяется по рис. 3.25		В бурте $\sigma_k = M_0 [1 - \omega (1 + 0,9\lambda)] \Psi_2 / (Dh^2)$ В кольце $\sigma_k' = M_0 \Psi_2 / (Dh^2)$
Условия прочности	В сечении $S_1 \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_k^2 + \sigma_1 \sigma_k} \leq \sigma_{\text{доп. 1}}$ В сечении $S_0 \sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2 + (\sigma_0 + \sigma_m) \sigma_t} \leq \sigma_{\text{доп. 0}}$		Для бурта: $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_k^2 + \sigma_1 \sigma_k} \leq \sigma_{\text{доп. 1}}$ $\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2 + (\sigma_0 + \sigma_m) \sigma_t} \leq \sigma_{\text{доп. 0}}$ Для кольца $\sigma_k \leq \sigma_{\text{доп. к}}$
Условие герметичности уплотнения	$\varphi = \sigma_k D / E_{20} h \leq [\varphi],$ где E_{20} — модуль упругости при 20°C ; $[\varphi] = 0,013$ — для фланцев по рис. 3.16, $[\varphi] = 0,09$ — для фланцев по рис. 3.15 при $D \leq 2$ м, $[\varphi] = 0,013$ — для фланцев по рис. 3.15 при $D > 2$ м		—

Таблица 3.15. Значение коэффициента α

Тип фланца	Давление p , МПа	Диаметр D , м	α
Плоский	До 0,6	$D \leq 1,2$	1,3
		$D > 1,2$	1,1
Приваренный встык	$1,0 \leq p \leq 1,6$	$D \leq 1,0$	1,5
		$D > 1,0$	1,35
	До 1,0	$D \leq 1,0$	1,1
		$D > 1,0$	1,2
	$1,0 < p \leq 1,6$	$D \leq 1,5$	1,1
		$D > 1,5$	1,2
	2,5		1,2
	4,0	$D \leq 2,0$	
	6,4—10,0		1,25

П р и м е ч а н и е. Для фланцев с резиновыми прокладками, с металлическими прокладками восьмиугольного сечения, а также для свободных (накидных) фланцев независимо от материала прокладки $\alpha = 1$.

Таблица 3.16. Допускаемые напряжения $\sigma_{\text{доп}}$, МПа, для стальных болтов (шпилек)

t , °C	35	Марка стали						
		0Х18Н10Т; ХГ7Н13М2Т	4Х14Н14В2М	35Х; 38ХА	25Х2МФА; 25Х1МФ	25Х2М1Ф	2Х12ВМВФР	20ХМФБР
20	130	110	160	230	230	230	230	230
100	126	105	—	230	230	230	230	230
200	120	98	—	225	225	225	230	225
250	107	95	—	222	220	220	225	220
300	97	90	—	220	215	215	220	215
350	86	86	—	185	215	215	215	215
375	80	85	—	175	210	210	210	210
400	75	83	—	160	210	210	210	210
425	68	82	—	—	182	195	190	185
450	—	80	—	—	156	180	185	180
475	—	79	—	—	127	165	143	165
500	—	78	100	—	96	150	120	150
510	—	—	95	—	84	137	110	140
520	—	—	90	—	74	120	98	130
530	—	—	85	—	65	100	88	118
540	—	—	80	—	55	75	75	105
550	—	—	75	—	—	64	—	90

Допускаемые напряжения материала фланцев:

для сечения S_1 $\sigma_{\text{доп}1} = \sigma_{20}\eta$;

для сечения S_0 при $p < 4,0$ МПа $\sigma_{\text{доп}0} = 0,003 E_{20}\eta$; при $p > 4,0$ МПа $\sigma_{\text{доп}0} = 0,002E_{20}\eta$;

для кольца свободного фланца $\sigma_{\text{доп.к}} = \sigma_{20}\eta$, где σ_{20} и E_{20} — предел текучести и модуль упругости материала фланца при 20°C ; η —

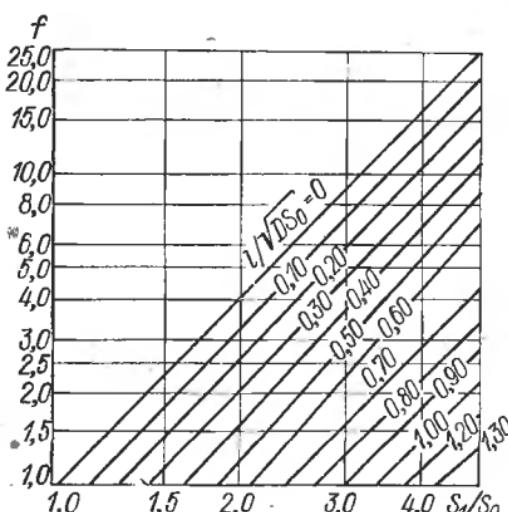


Рис. 3.24. Зависимость коэффициента f от S_1/S_0

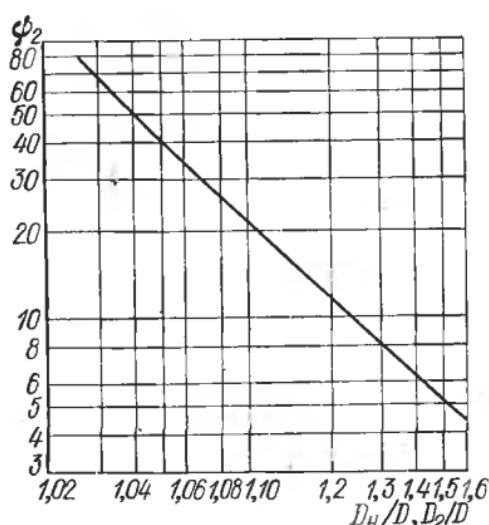


Рис. 3.25. Зависимость коэффициента Ψ_2 от D_H/D или от D_2/D (D_2/D — для накидных фланцев)

коэффициент, учитывающий токсичность и взрывоопасность среды по ГОСТ 14249—73, устанавливаемый специальной документацией. Если такой документации нет, то принимается $\eta = 0,9$. В остальных случаях (при отсутствии агрессивной среды) $\eta = 1,0$.

Т а б л и ц а 3.17. Значения коэффициента запаса n_T

Отношение предела текучести к пределу прочности σ_T/σ_B	Сталь	Затяжка болтов	
		неконтролируемая	контролируемая
≥0,6	Углеродистая или аустенитная	2,8	2,4
<0,6	Углеродистая	2,3	2,1
	Аустенитная	1,9	1,8

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЭКРАНОВ И КОРПУСОВ СММ ЭКРАНИРОВАННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Экраны и корпуса СММ, работающие под внутренним или наружным избыточным давлением или вакуумом, рассчитываются согласно ГОСТ 14249—73. При определении прочности экранов и корпусов расчетным является рабочее давление, при давлении менее 0,2 МПа за расчетное давление принимается 0,2 МПа.

Допускаемые напряжения материала корпуса или экрана $\sigma_{\text{доп}}$ определяются по формуле

$$\sigma_{\text{доп}} = \eta \sigma^*,$$

где σ^* — нормативное допускаемое напряжение. Определение η приведено в п. 3.6. Величины нормативных допускаемых напряжений для ряда материалов при различных расчетных температурах приведены в табл. 3.18 и 3.19. Расчетной температурой является наибольшая температура, определенная тепловым расчетом.

Т а б л и ц а 3.18. Нормативные допускаемые напряжения и пределы текучести магнитных сталей, МПа

Расчетная температура, °С	Марка стали					
	ВСтЗпс; ВСтЗсп; ВСтЗГсп		10		20	
	σ^*	σ_T	σ^*	σ_T	σ^*	σ_T
20	140	210	130	145	147	220
100	134	201	125	188	142	213
150	131	197	122	183	139	209
200	126	189	118	177	136	204
250	120	180	112	168	132	198
300	108	162	100	150	119	179
350	98	147	88	132	106	159
375	93	140	82	123	98	147
400	85	—	74	—	92	—
410	81	—	70	—	86	—
420	75	—	66	—	80	—
430	71 *	—	62	—	75	—
440	—	—	56	—	67	—
450	—	—	51	—	61	—
460	—	—	47	—	55	—
470	—	—	42	—	49	—
480	—	—	39 **	—	46 **	—

П р и м е ч а н и е. При рабочих температурах менее 20° С допустимые напряжения принимают такими же, как при 20° С.

* При расчетной температуре 425° С.

** При расчетной температуре 475° С.

Для материалов, не упомянутых в табл. 3.18 и 3.19, σ^* определяются следующим образом: при расчетной температуре, не превышающей для углеродистых сталей 380°C , для низколегированных 420°C , для аустенитных 525°C за нормативное σ^* принимается меньшее значение из значений

$$\sigma^* = \sigma_B/n_B \quad \text{или} \quad \sigma^* = \sigma_T/n_T,$$

где σ_B — минимальное значение предела прочности при расчетной температуре; σ_T — минимальное значение предела текучести при расчетной температуре; n_B и n_T — коэффициенты запаса по пределу прочности и пределу текучести, $n_T = 1,5$ и $n_B = 2,6$.

Таблица 3.19. Нормативные допускаемые напряжения и пределы текучести немагнитных сталей, МПа

Расчетная температура, $^\circ\text{C}$	Марка стали				Расчетная температура, $^\circ\text{C}$	Марка стали				
	12X18H10T; 12X18H12T		08X18H10T; 08X18H12T			12X18H10T; 12X18H12T		08X18H10T; 08X18H12T		
	σ^*	σ_T	σ^*	σ_T		σ^*	σ_T	σ^*	σ_T	
20	160	240	140	210	520	112	168	79	119	
100	152	228	130	195	530	111	167	79	119	
150	146	219	120	180	540	111	—	78	—	
200	140	210	115	173	550	111	—	76	—	
250	136	204	110	165	560	101	—	73	—	
300	130	195	100	150	570	97	—	69	—	
350	126	190	91	137	580	90	—	65	—	
375	124	186	89	133	590	81	—	61	—	
400	121	181	86	129	600	74	—	57	—	
410	120	180	86	128	610	68	—	—	—	
420	120	180	85	128	620	62	—	—	—	
430	119	179	85	127	630	57	—	—	—	
440	118	177	84	126	640	52	—	—	—	
450	117	176	84	125	650	48	—	—	—	
460	116	174	83	125	660	45	—	—	—	
470	115	173	83	124	670	42	—	—	—	
480	115	173	82	123	680	38	—	—	—	
490	114	171	82	122	690	34	—	—	—	
500	113	170	81	122	700	30	—	—	—	
510	112	168	80	120						

Примечания: 1. При рабочих температурах менее 20°C допустимые напряжения принимают такими же, как при 20°C . 2. Стали 12X18H10T и 12X18H12T не следует применять при температуре выше 600°C . 3. Для сталей 12X18H10T и 12X18H12T величины σ^* до 550°C с минимальным пределом текучести при 20°C $\sigma_T < 240$ МПа умножаются на отношение $\sigma_T/240$; для сталей 08X18H10T и 08X18H12T с $\sigma_T < 210$ МПа — на отношение $\sigma_T/210$.

Если расчетная температура выше указанных ранее значений, то за σ^* принимается меньшее из значений

$$\sigma^* = \sigma_t/n_t \text{ или } \sigma^* = \sigma_d/n_d,$$

где σ_d — среднее значение предела длительной прочности за 100 тыс. ч при расчетной температуре; n_d — коэффициент запаса по пределу длительной прочности, $n_d = 1,5$.

При отсутствии данных по пределу длительной прочности σ_d за σ^* принимают меньшее из значений

$$\sigma^* = \sigma_t/n_t \text{ или } \sigma^* = \sigma_n,$$

где σ_n — среднее значение 1% предела ползучести за 100 тыс. ч при расчетной температуре.

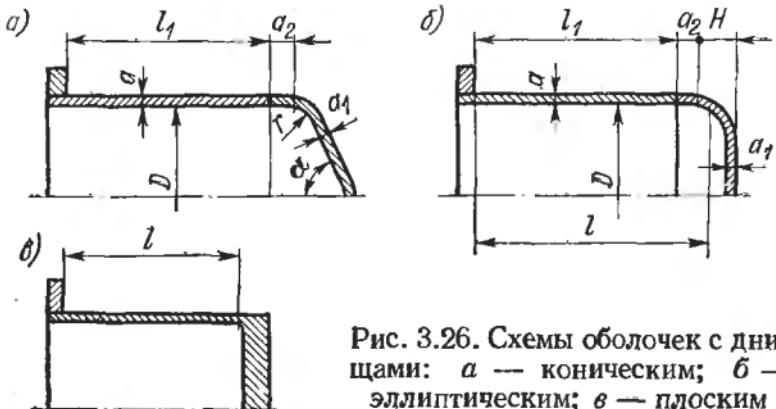


Рис. 3.26. Схемы оболочек с днищами: а — коническим; б — эллиптическим; в — плоским

Значения нормативного допускаемого напряжения уменьшаются для отливок с индивидуальным контролем качества в 1,25 раза; для остальных — в 1,4 раза. Значения модуля поперечной упругости определяют при расчете по табл. 3.20.

При сварке экранов и корпусов в расчеты вводится коэффициент φ , характеризующий прочность сварного шва в сравнении с прочностью основного металла. При стыковых сварных соединениях с двусторонним сплошным проваром, выполняемых автоматической сваркой, $\varphi = 1$, при сварке вручную $\varphi < 0,95$, при односторонней сваркестык $\varphi < 0,9$, при соединении внахлест и двустороннем шве $\varphi < 0,8$.

Экран или корпус образуют герметичную оболочку. Схемы наиболее простых оболочек показаны на рис. 3.26.

I. Расчет на прочность цилиндрической оболочки. При внутреннем давлении: при $(a - c)/D \leq 0,1$ толщина

$$a = pD/(2\varphi\sigma_{\text{доп}} - p) + c + c_1;$$

допускаемое давление

$$p_{\text{доп}} = 2\varphi\sigma_{\text{доп}}(a - c)/(D + a - c),$$

где c — увеличение толщины a для компенсации коррозии; c_1 — конструктивная добавка толщины a ; D — внутренний диаметр оболочки.

Таблица 3.20. Значения модуля поперечной упругости

Сталь	Модуль поперечной упругости $10^{-5} \cdot E$, МПа при температуре, °С						
	20	100	150	200	250	300	350
Углеродистая	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64
Легированная	2,00	2,00	1,99	1,97	1,94	1,91	1,86
Сталь	Модуль поперечной упругости $10^{-5} \cdot E$, МПа при температуре, °С						
	400	450	500	550	600	650	700
Углеродистая	1,55	1,4	—	—	—	—	—
Легированная	1,81	1,75	1,68	1,61	1,53	1,45	1,36

При наружном давлении: в первом приближении можно использовать формулы расчета толщины оболочки при внутреннем давлении.

1. Гладкие оболочки, работающие в пределах упругости и при

$$0,052 \sqrt[6]{p \cdot 10^6 / E} \leq l/D \leq 7,68 \sqrt[6]{E \cdot 10^{-6} / p}$$

и

$$1,5 \sqrt{2(a - c)/D} \leq l/D \leq \sqrt{0,5D/(a - c)},$$

где l — расстояние вдоль оси оболочки между кольцами жесткости (например, между дном экрана и фланцем или утолщенной частью) рассчитывают на устойчивость следующим образом:

толщина оболочки

$$a = 0,0047D [pl/(10^{-6} \cdot ED)]^{0,4} + c + c_1;$$

допускаемое давление

$$p_{\text{доп}} = 6,49 \cdot 10^{-6} E \frac{D}{l} \left[\frac{100(a - c)}{D} \right]^{2,5},$$

формулы применимы при

$$(a - c)/D \leq 1,1 \cdot 10^{-2} [10^3 l \sigma_t / (DE)]^{2/3}.$$

Если это условие не выполнено, допускаемое наружное давление определяется по формуле

$$p_{\text{доп}} = 2E(a - c)/(D\xi_1),$$

где

$$\xi_1 = \frac{1,5E}{\sigma_T} + 1,53 \frac{\sigma_T}{E} \frac{D}{a - c} \left(\frac{l}{a - c} \right)^2.$$

2. Оболочку при $l/D > 7,68 \sqrt[6]{E \cdot 10^{-6}/p}$ и $l/D > \sqrt{0,5D/(a - c)}$ рассчитывают на устойчивость следующим образом:
толщина оболочки

$$a = 0,0106D^3 \sqrt[3]{10^6 p/E} + c + c_1;$$

допускаемое давление

$$p_{\text{доп}} = 0,85 \cdot 10^{-6} E [100(a - c)/D]^3;$$

формулы применимы при

$$(a - c)/D \leq 0,95 \sqrt{\sigma_T/E}.$$

Если это условие не выполняется, то

$$p_{\text{доп}} = 2E(a - c)/(D\xi_2),$$

где

$$\xi_2 = \frac{1,5E}{\sigma_T} + \left(\frac{D}{a - c} \right)^2.$$

В расчетах по пп. 1 и 2 коэффициент запаса устойчивости по отношению к нижним значениям критических давлений принят $n_{\text{уст}} = 2,6$.

Для оболочек, потеря устойчивости которых происходит за пределом упругости, $n_{\text{уст}}$ составляет:

для расчетов по п. 1

$$n_{\text{уст}} = 1,5 + 1,53 \frac{\sigma_T l D}{E(a - c)^2};$$

для расчетов по п. 2

$$n_{\text{уст}} = 1,5 + 1,005 \frac{\sigma_T}{E} \left(\frac{D}{a - c} \right)^2.$$

Величину расчетной длины оболочки l следует определять с учетом днища. При эллиптическом днище $l = l_1 + a_2 + H/3$; при коническом отбортованном днище $l = l_1 + a_2 + a_1$, где $a_1 = r \sin \alpha$; при плоском или неотбортованном днище за расчетную принимают длину неукрепленной части.

В случае, если на оболочке имеются кольца жесткости, то рассчитывают, как было показано выше, участки оболочки между кольцами.

Днище оболочки создает сжимающую силу, поэтому следует провести проверку на устойчивость по формуле

$$N/N_{\text{доп}} + p/p_{\text{доп}} \leq 1, \text{ причем } N \leq N_{\text{доп}},$$

где N — расчетная осевая сжимающая сила; $N_{\text{доп}}$ — допустимая осевая сжимающая сила, $N_{\text{доп}} = \pi D (a - c) \varphi_c \sigma^*$, где φ_c — коэффициент уменьшения допускаемых напряжений.

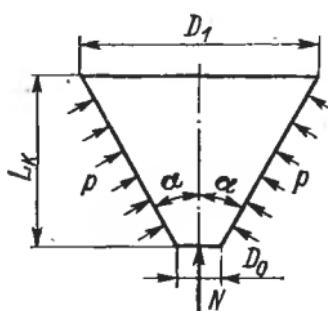


Рис. 3.27. Схема действия сил на конический экран при наружном давлении

$$\begin{aligned} \text{При } 0,5D/(a-c) > 0,18E/\sigma_T \quad \varphi_c = \\ = 1,5k_c E(a-c)/(\sigma_T D); \\ \text{при } 0,5D/(a-c) < 0,18E/\sigma_T \quad \varphi_c = \\ = \frac{1}{1 + 23 \{0,5D\sigma_T/[E(a-c)]\}^2}. \end{aligned}$$

Параметр k_c зависит от соотношения $0,5D/(a-c)$ и имеет следующие значения:

$0,5D/(a-c)$	250	500	750	1000	1500	2000
k_c	0,140	0,120	0,095	0,080	0,070	0,060

При значениях $0,5D/(a-c)$ от $0,18E/\sigma_T$ до 250 $k_c = 0,14$.

II. Расчет на прочность конического экрана. При внутреннем давлении: если угол при вершине конуса $2\alpha \leq 140^\circ$ и $(a-c)/D \leq 0,1/\cos \alpha$, то толщина экрана

$$a = \frac{pD}{2\varphi\sigma_{\text{доп}} - p \cos \alpha} \frac{1}{\cos \alpha} + c + c_1;$$

допускаемое давление

$$p_{\text{доп}} = \frac{2\varphi\sigma_{\text{доп}}(a-c)}{y_0 D + (a-c)}.$$

Коэффициент y_0 определяется по формуле

$$y_0 = \frac{0,4}{\sqrt{(a-c)/D}} \frac{\tan \alpha \sqrt{\cos \alpha}}{\sqrt{\cos \alpha} + 1} + 0,5.$$

При наружном давлении: схема действия сил на экран показана на рис. 3.27. Конический экран должен быть проверен на устойчивость по формуле

$$N/N_{\text{доп}} + p/p_{\text{доп}} \leq 1,$$

где N — расчетная осевая сжимающая сила; $N_{\text{доп}}$ — допустимая осевая сжимающая сила,

$$N_{\text{доп}} = \varphi_c \sigma^* \pi D_p (a - c) \cos^2 \alpha.$$

Величина φ_c определена выше, но вместо D следует принять расчетный диаметр D_p

$$D_p = 0,45 (D_1 + D_0).$$

Допускаемое наружное давление определяют по формулам для цилиндрической оболочки, но l заменяют на L_k , а D — на D_p .

III. Расчет на прочность днищ и плоских экранов. Эллиптическая стенка при внутреннем давлении: при $(a_1 - c)/D \ll 0,1$ и $H \geq 0,2D$ толщина стенки

$$a_1 = pR/(2\phi\sigma_{\text{доп}} - 0,5p) + c + c_1.$$

Допускаемое давление

$$p_{\text{доп}} = \frac{2(a_1 - c)\phi\sigma_{\text{доп}}}{R + 0,5(a_1 - c)},$$

где R — радиус кривизны в вершине днища, $R = D^2/(4H)$; чаще всего $H = 0,25D$, $R = D$.

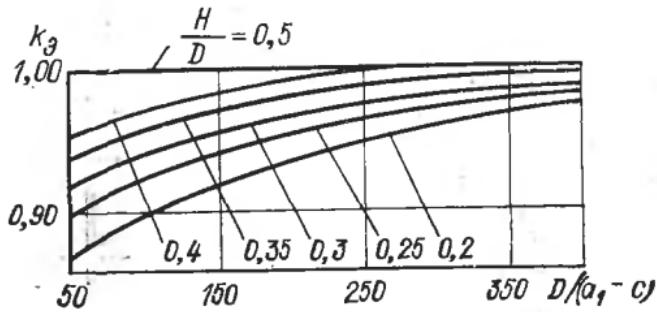


Рис. 3.28. Зависимость коэффициента k_3 от $D/(a_1 - c)$

Эллиптическая стенка при наружном давлении: при расчете толщины стенок берут большее из значений, определенных по формулам:

$$a_1 = \frac{k_3 R}{300} \sqrt{\frac{p}{10^{-6} E}} + c + c_1;$$

$$a_1 = 0,5pR\beta_1/\sigma_{\text{доп}} + c + c_1.$$

Допускаемое давление принимают наименьшим из значений:

$$p_{\text{доп}} = 9 \cdot 10^{-6} E [(a_1 - c) 100/(k_3 R)]^2;$$

$$p_{\text{доп}} = 2\sigma_{\text{доп}} (a_1 - c)/(\beta R).$$

Здесь k_3 в первом приближении принимается равным 1,0. Уточненное значение k_3 определяют по рис. 3.28. Значения коэффициентов:

$$\beta = 1 + 6k_3^2 \frac{\sigma_t}{E} \frac{R}{a_1 - c};$$

$$\beta_1 = 0,5 + \sqrt{0,25 + 12k_3^2 \sigma_1 \sigma_{\text{доп}} / (Ep)}.$$

Плоская круглая стенка (днище, крышка или экран): толщину стенки — определяют по формуле

$$a_1 = kD \sqrt{p/\sigma_{\text{доп}}} + c + c_1,$$

где k — конструктивный коэффициент. Значения его приведены в табл. 3.21. Величину радиуса r принимают по конструктивным соображениям. В формуле для определения a_1 для оболочек типов 2 и 3 вместо D принимают $D - r$.

Таблица 3.21. Значения коэффициента k

Тип оболочки	Конструкция	k	Тип оболочки	Конструкция	k
1		0,55	3		0,4
2		—	4	 При $l \geq \sqrt{D(a-c)}$ $k = 0,45(1 - 0,23a/a_1) \geq 0,35$ При $l < \sqrt{D(a-c)}$ $k = 0,47(1 - 0,23a/a_1) \geq 0,4$	0,45

Допускаемое рабочее давление определяют по формуле

$$p = [(a_1 - c)/(kD)]^2 \sigma_{\text{доп}}.$$

При установке плоской круглой стенки на болтах к фланцу (рис. 3.29) толщина стенки

$$a_1 = k_1 D_{\text{с.п.}} \sqrt{p/\sigma_{\text{доп}}} + c + c_1.$$

Здесь

$$k_1 = \sqrt{0,0515 (D_6/D_{c,n} + 1)^2 + 0,5 (D_6/D_{c,n} - 1) (\psi - 1)},$$

где $\psi = P_6/Q_d$; P_6 — нагрузка от затяжки болтов; Q_d — равнодействующая внутреннего давления. Расчет P_6 и Q_d см. п. 3.6.

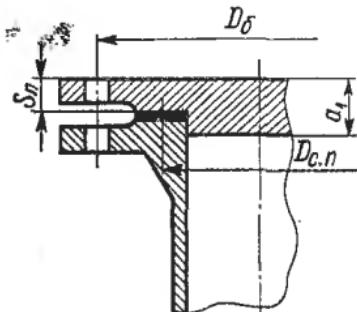


Рис. 3.29. Схема плоской круглой стенки, устанавливаемой на болтах

Допускаемое рабочее давление на плоскую круглую стенку, присоединенную на болтах к фланцу, определяют по формуле

$$p_{\text{доп}} = [(a_1 - c)/(k_1 D_{c,n})]^2 \sigma_{\text{доп}}.$$

Толщина фланца

$$S_n = k_2 \sqrt{P_6/\sigma_{\text{доп}}} + c,$$

где $k_2 = 0,8 \sqrt{D_6/D_{c,n} - 1}$. Кроме того, $S_n \geq 0,85a_1$.

3.8 РАСЧЕТ ДОПУСТИМОЙ ОСТАТОЧНОЙ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ РОТОРОВ. БАЛАНСИРОВКА РОТОРОВ

В соответствии с ГОСТ 12327—66 роторы в зависимости от массы делятся на три группы: от 0,01 до 0,1 кг (микророторы); свыше 0,1 до 3 кг (малые роторы); свыше 3 до 1000 кг (средние роторы). Для роторов устанавливается три класса точности уравновешивания — нулевой, первый и второй. Нулевой и первый классы должны указываться в технической документации на СММ. Отсутствие указаний по точности уравновешивания означает, что принят второй класс.

Назначение класса точности уравновешивания производится с учетом данных всего устройства — соотношения масс вращающихся частей и корпуса, жесткости корпуса, характеристики установки СММ, назначения механизма и эксплуатационных требований.

При выборе класса точности уравновешивания следует руководствоваться следующими данными:

а) для СММ общепромышленного назначения с обычными требованиями по уровню вибрации достаточно уравновешивания по второму классу точности. Такие устройства, как правило, с подшипниками нулевого или шестого классов (ГОСТ 520—71);

б) уравновешивание по первому классу точности рекомендуется для СММ с повышенными требованиями по уровню вибрации, например

СММ повышенной точности, СММ с подшипниками шестого и пятого классов (ГОСТ 520—71);

в) уравновешивание по нулевому классу точности необходимо для СММ с особо жесткими требованиями по уровню вибрации и надежности, высокоскоростных, работающих на подшипниках четвертого и второго классов (ГОСТ 520—71).

В технически обоснованных случаях по согласованию между заказчиком и предприятием-изготовителем допускается предъявление более жестких требований по точности уравновешивания, чем это предусмотрено нулевым классом, а также выпуск роторов без назначения нормы балансировки; в каждом из этих случаев должно быть соответствующее указание технической документации. Окончательно класс уравновешивания уточняется после испытания опытных образцов.

Второй класс точности уравновешивания может быть получен при балансировке ротора на окончательно обработанных цапфах вала. Роторы с первым классом точности уравновешивания рекомендуется уравновешивать на балансировочном станке в собственных подшипниках.

Балансировку роторов с нулевым классом точности уравновешивания необходимо производить на балансировочном станке в собственных подшипниках (или на внутренних кольцах подшипников). В конструкции таких СММ должна быть предусмотрена возможность балансировки в окончательно собранной машине.

Детали, устанавливаемые на отбалансированный ротор (вентиляторы, муфты, шкивы и т. п.), должны быть конструктивно уравновешены, т. е. конструкция детали в предположении о точном соблюдении номинальных размеров и однородности материала должна принципиально обеспечивать отсутствие неуравновешенности. При демонтаже подшипников роторов, которые уравновешивались в собственных подшипниках, необходимо фиксировать угловое положение внутреннего кольца подшипника относительно вала, чтобы при повторной сборке восстановить первоначальное взаимное расположение вала и внутреннего кольца подшипника. То же относится и к другим съемным деталям ротора.

Для балансировки жестких роторов (с рабочей частотой вращения не более 0,7 первой критической частоты вращения) компенсация неуравновешенности должна производиться путем добавления или удаления массы в двух плоскостях исправления при отношении осевого размера L к диаметру D $L/D \geq 0,2$; при $L/D < 0,2$ допускается одна плоскость исправления.

Удельная остаточная неуравновешенность¹ ротора, оставшаяся после балансировки e , условно отнесенная к центру тяжести ротора, в зависимости от номинальной частоты вращения n не должна превышать предельных величин, указанных для микророторов на рис. 3.30, *a*;

¹ За единицу измерения неуравновешенности Δ принято произведение величины неуравновешенной массы m на расстояние ее центра тяжести от оси вращения r , равное 1 г·мм. При необходимости допускаются другие единицы с размерностью единица массы, умноженная на единицу длины. Удельная неуравновешенность e есть неуравновешенность Δ , приходящаяся на 1 кг массы ротора. Удельная неуравновешенность e (10^{-3} мм) равна величине неуравновешенности ротора Δ (г·мм), деленной на массу ротора M (кг) $e = \Delta/M = m_1r_1/M$.

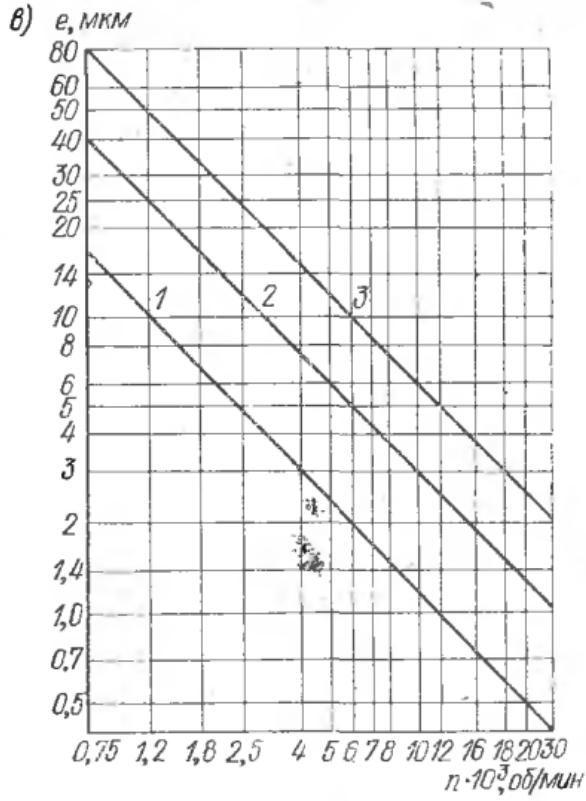
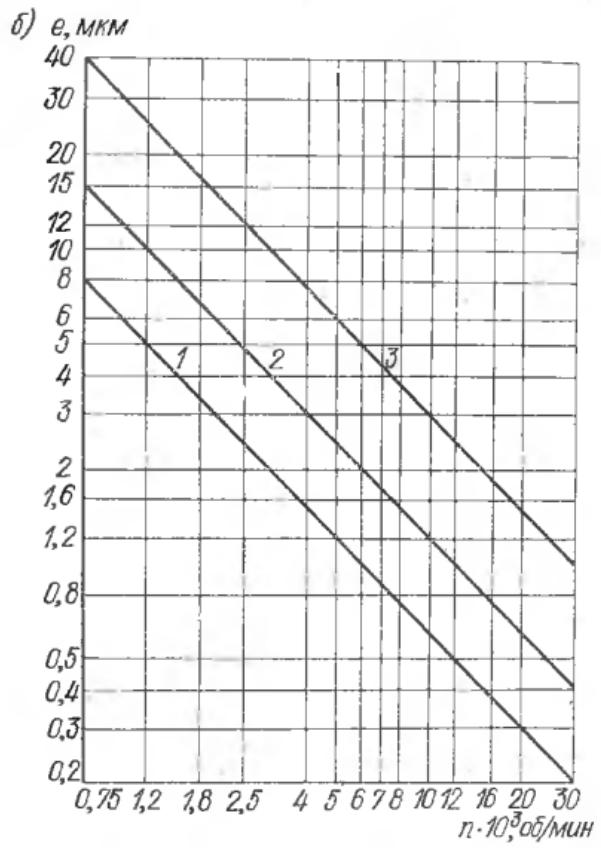
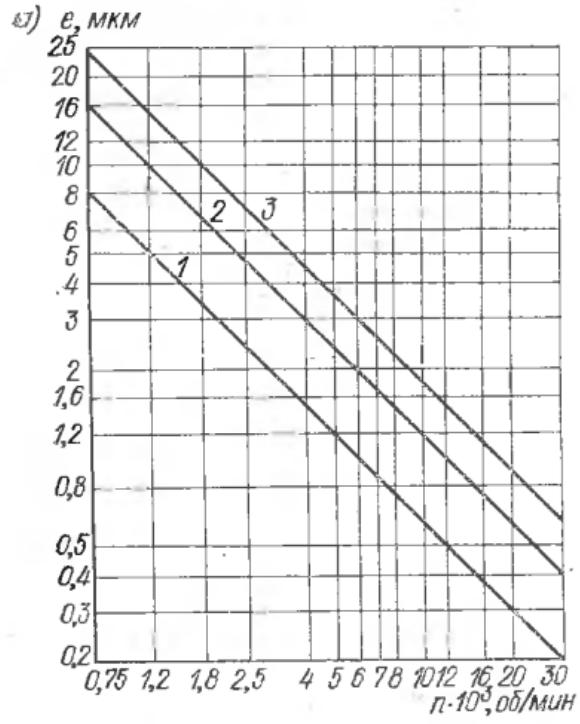


Рис. 3.30. Допустимые удельные остаточные неуравновешенности роторов: а — масса ротора от 0,01 до 0,1 кг; б — масса ротора свыше 0,1 — до 3 кг; в — масса ротора свыше 3 до 1000 кг;

1, 2 и 3 — соответственно нулевой, первый и второй классы точности уравновешивания

для малых роторов — на рис. 3.30, б, для средних роторов — на рис. 3.30, в.

Допустимые удельные остаточные неуравновешенности роторов с рабочей частотой вращения n менее 750 об/мин определяют по формуле

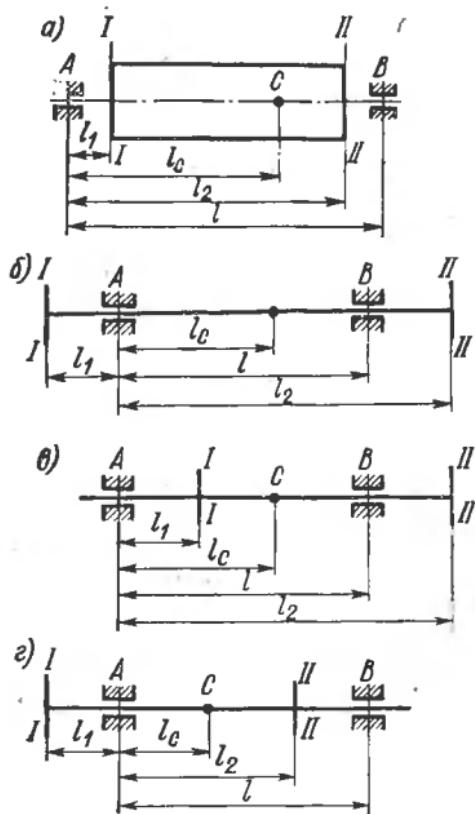


Рис. 3.31. Схема расположения плоскостей исправления роторов:
а — плоскости исправления I и II между опорами; б — плоскости исправления I и II за опорами; в — плоскость исправления I между опорами, плоскость II справа от опоры B; г — плоскость исправления II между опорами, плоскость исправления I слева от опоры A;
A, B — опоры; C — центр тяжести ротора

от левой опоры A до плоскостей исправления и расстояние от левой опоры A до центра тяжести ротора.

В частных случаях: а) при симметричном положении плоскостей исправления относительно центра тяжести $\Delta_1 = \Delta_2 = 0,5Me$; б) при одной плоскости исправления $\Delta = Me$,

$$e_n = 750e/n,$$

где e — допустимая удельная остаточная неуравновешенность, определенная по рис. 3.30 для соответствующих роторов при частоте вращения 750 об/мин.

Для роторов СММ, работающих с регулируемой скоростью, допустимые удельные остаточные неуравновешенности определяются исходя из наибольшей номинальной частоты вращения. Положение плоскостей исправления назначается для каждого конкретного конструктивного варианта СММ. Наиболее распространен конструктивный вариант ротора, показанный на рис. 3.31, а. В этом случае плоскости исправления совмещаются с торцами ротора.

Допустимые остаточные неуравновешенности (\cdot мм) роторов Δ_1 и Δ_2 в плоскостях исправления I и II, расположенных между опорами и по разные стороны от центра тяжести ротора, вычисляют по формулам:

$$\Delta_1 = Me \frac{l_2 - l_c}{l_2 - l_1};$$

$$\Delta_2 = Me \frac{l_c - l_1}{l_2 - l_1},$$

где M — масса ротора, кг; e — допустимая удельная остаточная неуравновешенность, условно отнесенная к центру тяжести ротора, мкм; l_1 , l_2 — расстояния

В случае установки на консоли вала деталей одну из плоскостей исправления следует взять на этой детали. При двух консолях — на обеих консолях. При этом допустимую остаточную неуравновешенность Me , условно рассматриваемую в центре тяжести ротора, следует распределить между плоскостями исправления I и II таким образом, чтобы реакции на опорах от центробежных сил, вызванных неуравновешенностями Δ_1 , Δ_2 , не превышали реакций от неуравновешенности Me в центре тяжести ротора. В случае, показанном на рис. 3.31, б, допустимые остаточные неуравновешенности роторов в плоскостях исправления I и II вычисляют по формулам:

$$\Delta_1 = Me \frac{l_c l_1 + l_2 (l - 2l_c)}{l (l_1 + l_2)},$$

$$\Delta_2 = Me \frac{l_c l - l_1 (l - 2l_c)}{l (l_1 + l_2)},$$

где M — масса ротора, кг; e — допустимая удельная остаточная неуравновешенность, условно отнесенная к центру тяжести ротора, мкм (10^{-3} мм); l — расстояние между опорами, мм; l_1 , l_2 — расстояния от левой опоры A до плоскостей исправления I и II, мм; l_c — расстояние от левой опоры A до центра тяжести C ротора, мм.

Формулы применимы, когда положение центра тяжести ротора удовлетворяет условию

$$0,5 \left(1 - \frac{1}{2l_1/l - 1} \right) \leq l_c/l \leq 0,5 \left(1 + \frac{1}{2l_2/l - 1} \right).$$

Для случая, показанного на рис. 3.31, в, когда левая плоскость исправления находится между опорами, а правая — за опорой B , значения допустимых остаточных неуравновешенностей роторов в плоскостях исправления I и II определяют как наименьшие значения из рассчитанных величин:

Δ_1 — меньшее из

$$Me \frac{l_2 - l_c}{l_2 - l_1} \text{ и } Me \frac{l_c l + l_2 (l - 2l_c)}{l (l_2 - l_1)};$$

Δ_2 — меньшее из

$$Me \frac{l_c - l_1}{l_2 - l_1} \text{ и } Me \frac{l_c l + l_1 (l - 2l_c)}{l (l_2 - l_1)}.$$

Формулы применимы, если они дают положительные значения Δ_1 и Δ_2 при расположении центра тяжести между левой плоскостью исправления и опорой B .

Для случая, когда левая плоскость исправления находится за опорой A , а правая — между опорами (рис. 3.31, г), значения допустимых остаточных неуравновешенностей роторов в плоскостях исправления I и II определяют как наименьшие значения из рассчитанных величин:

Δ_1 — меньшее из

$$Me \frac{l_2 - l_c}{l_1 + l_2} \text{ и } Me \frac{l l_c + l_2 (l - 2l_c)}{l (l_2 + l_1)};$$

Δ_2 — меньшее из

$$Me \frac{l_1 + l_c}{l_1 + l_2} \text{ и } Me \frac{l_c l - l_1 (l - 2l_c)}{l (l_2 + l_1)}.$$

Формулы применимы, если они дают положительные значения Δ_1 и Δ_2 при расположении центра тяжести ротора между опорой A и правой плоскостью исправления.

При установке на отбалансированный ротор деталей массой M_d , они должны быть отдельно отбалансированы. Допустимая остаточная неуравновешенность детали $\Delta_d = M_d e$, где e определена для ротора в целом и берется не менее 0,2 от меньшей из допустимых неуравновешенностей в плоскостях исправления ротора.

Неуравновешенность устраняется сверлением отверстий или добавлением грузов в плоскостях исправления. На чертеже следует указывать положение плоскости исправления и метод устранения неуравновешенности.

Примеры указаний на чертежах:

1. Неуравновешенность устранять путем установки грузов в плоскостях исправления I—I и II—II. Крайние грузы закернить.

2. Неуравновешенность устранять сверлением отверстий $\varnothing 5$ мм глубиной не более 10 мм на радиусе $R = 32$ мм в плоскостях исправления I—I и II—II.

3.9 РАСЧЕТ ВАЛОВ

Синхронные магнитные механизмы, передающие вращение, имеют в конструкции роторов валы, на которых установлены элементы механизма. Прочность вала в значительной степени определяет надежность и работоспособность устройства. Это делает необходимым расчет валов. При расчете вал рассматривается как балка переменного сечения, лежащая на опорах — подшипниках и нагруженная поперечными изгибающими силами и моментами. Подшипники качения при расчете следует рассматривать как жесткие шарнирные опоры. Расстояние между опорами берется равным расстоянию между осевыми плоскостями подшипников. При расчете вала с подшипниками скольжения это допущение также возможно при условии, что место опирания находится на расстоянии до 0,5 диаметра шейки вала в подшипнике, но не более 0,25—0,3 длины подшипника от кромки подшипника со стороны пролета вала. Определение размеров вала ведется с части, где размещена магнитная система, рассчитанная при электромагнитном расчете устройства.

При сложной многоступенчатой форме, которую не удается привести к валу постоянного сечения, следует привести вал к одной или двум ступеням изменения сечения. При этом принимаются допущения: 1) бурты, выточки, лыски в расчете не учитываются; 2) на участках вала с резьбой расчетным является внутренний диаметр резьбы; 3) расчетным диаметром свободных шлицевых участков вала является средний диаметр шлицев; 4) шлицы учитываются, если они имеют длину или выступают из-под насыженного на них элемента конструкции на

длину более одного диаметра; 5) при посадке на гладкий вал или шлицы детали с натягом расчетным диаметром вала на рассматриваемом участке является наружный диаметр этой детали; 6) при установке на вал между деталями или подшипниками распорной втулки и затяжке деталей или колец подшипников и втулки за расчетный принимается наружный диаметр втулки.

Если при принятых допущениях расчетная схема вала все еще имеет большое число ступеней, то дальнейшая схематизация должна сводиться к разделению вала на участки и выбору расчетного сечения

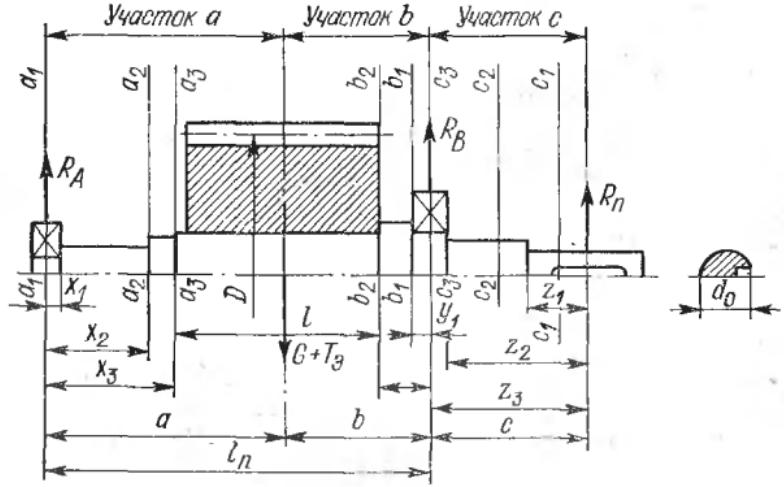


Рис. 3.32. Схема ротора при расположении активной части СММ между опорами

для каждого участка. Расчетным следует считать сечение того отрезка вала, который на рассматриваемом участке имеет наибольшую длину. Для консольных участков вала за расчетное сечение принимается сечение участка, примыкающего к опоре, а для участка между опорами — сечение части вала в середине пролета. Принятые в расчетной схеме диаметры участков вала являются в дальнейшем расчетными, определяют расчетные моменты инерции и жесткость участков вала на изгиб.

Расчет вала сводится к расчетам на прочность, жесткость и к расчету критической скорости под действием сил неуравновешенности ротора, его массы, сил магнитного притяжения и реакции передачи на конец вала [7, 37, 40].

Расчет вала на жесткость. Наиболее сложна для расчета конструкция ротора, в которой активная часть (магнитопровод) СММ расположена между подшипниками, а исполнительный механизм находится на консоли вала. Схема такого ротора приведена на рис. 3.32. Вал является ступенчатым даже с учетом приведенных выше допущений. В худшем случае распределения нагрузок сила тяжести вала и активной части СММ G , а также сила одностороннего магнитного притяжения T_g приложены в середине активной части и совпадают по направлению, а реакция передачи R_n приложена в середине шпоночного паза на консоли вала и направлена в противоположную сторону.

Вал разбивают на участки. Прогиб вала рассчитывают под действием каждой силы в отдельности, а затем суммируют.

1. Прогиб вала (м) в середине активной части под действием силы G

$$f_G = \frac{G}{3El_{\Pi}^2} (a^2 S_b + b^2 S_a).$$

Здесь G — сила тяжести вала и активной части СММ, Н; E — модуль продольной упругости, Па; l_{Π} — расстояние между точками приложения реакций, м; a, b — расстояния (см. рис. 3.32), м;

$$S_a = \sum \frac{x_n^3 - x_{n-2}^3}{J_n}; \quad S_b = \sum \frac{y_n^3 - y_{n-1}^3}{J_n},$$

где x_n и y_n — расстояния n -го сечения от точки приложения реакции опор R_A и R_B , м; J_n — экваториальный момент инерции n -го сечения вала, м^4 ,

$$J_n = \pi d_n^4 / 64,$$

где d_n — диаметр n -го сечения вала, м.

При определении величины G учитывают массу вала и активной части СММ. Массой деталей вблизи опор можно пренебречь. Расчетный диаметр принимается по середине зубцов. Активная часть рассматривается как сплошной цилиндр с плотностью ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$). Тогда $G = 0,785D^2l\rho g$, g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$.

2. Прогиб (м) вала в середине активной части СММ под действием силы R_{Π}

$$f_{\Pi} = \frac{R_{\Pi}c}{3El_{\Pi}^2} [(1,5l_{\Pi}S_0 - S_b)a + bS_a],$$

где a, b, c, l_{Π} — длины, м; $S_0 = (y_n^2 - y_{n-1}^2)/J_n$.

Величина R_{Π} (Н) может быть определена из формулы

$$R_{\Pi} = k_{\Pi}M_{\Pi}/r,$$

где M_{Π} — номинальный передаваемый момент, $\text{Н}\cdot\text{м}$; r — радиус делительной окружности шестерни или шкива, кулачков муфты; k_{Π} — коэффициент передачи, для зубчатой передачи $k_{\Pi} = 1,05$, клиновременной $k_{\Pi} = 1,8$, плоскоременной $k_{\Pi} = 3,0$.

3. Прогиб вала (м) под действием силы одностороннего магнитного притяжения T_s , вызванного начальным эксцентричным расположением активной части СММ,

$$f_{s.o.} = f_G T_{s.o.}/G,$$

где f_G — прогиб под действием веса G (см. п. 1); $T_{s.o.}$ — сила одностороннего магнитного притяжения при начальном эксцентризите $e_0 = 0,18 + f_G + f_{\Pi}$. Здесь 0,18 — прогиб, обусловленный погрешностями изготовления, сборки и износом подшипников.

Расчет величины $T_{s.o.}$ приведен в п. 2.10.

4. Установившийся прогиб от конечной силы магнитного притяжения

$$f_{\vartheta} = f_{\vartheta,0} / (1 - f_{\vartheta,0}/e_0).$$

Результирующий прогиб (м)

$$f = f_{\vartheta} + f_G + f_{\Pi}.$$

Необходимо, чтобы $f = (0,05 \div 0,1) \delta'$ для экранированного исполнения или $f = (0,05 \div 0,1) \delta$ для неэкранированного исполнения СММ.

Часто встречается вариант ротора с активной частью СММ на одной консоли и исполнительным механизмом на другой (рис. 3.33). Вал такого ротора может быть приведен к валу постоянного сечения. Следует рассчитать в этом случае прогиб конца вала, на котором располагается активная часть СММ.

Если реакция передачи пренебрежимо мала, то прогиб в точке приложения G и T_{ϑ}

$$f = \frac{G + T_{\vartheta}}{EJ} \frac{(l + a) a^2}{3}.$$

В случае $(G + T_{\vartheta}) a \approx R_{\Pi} c$ и $a \approx c$

$$f = \frac{G + T_{\vartheta}}{EJ} \frac{c^3}{3} \left(l + \frac{3l}{2c} \right).$$

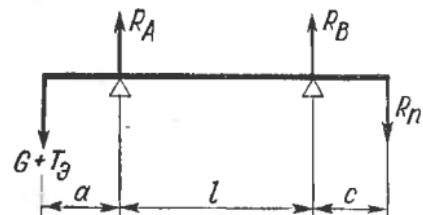


Рис. 3.33. Схема ротора при расположении активной части СММ на консоли

Вначале определяют, как выше, f_G , затем $f_{\vartheta,0}$. При этом $T_{\vartheta,0}$ определяют для $e_0 = 0,16 + f_G$. После расчета f_{ϑ} величина общего прогиба $f = f_{\vartheta} + f_G$. Если длина ротора l_p , то край ротора имеет прогиб

$$f_p = f (a + 0,5l_p)/a.$$

Приведенные методы расчета являются упрощенными. Более точными являются методы аналитический и графоаналитический, используемые в теории сопротивления материалов и теоретической механике.

Расчет вала на прочность. При расчете на прочность определяют напряжения в металле вала. Рассмотрим последовательность расчета на прочность вала, показанного на рис. 3.32, причем силу R_{Π} примем направленной в сторону $G + T_{\vartheta}$.

1. Вал разделяют на участки a , b и c . Целесообразно, чтобы $l_p/c = 1,5 \div 2$, так как при значениях отношения менее 1,5 резко возрастают значения реакций R_A и R_B , а увеличение отношения свыше 2 слабо меняет силы, но увеличивает осевые размеры вала.

2. Исходя из равенства суммы моментов сил относительно опор нулю, определяют реакции опор:

$$R_A = (G + T_{\vartheta} + F_{\Pi}) b/l_p + R_{\Pi} c/l_p;$$

$$R_B = (G + T_{\vartheta} + F_{\Pi}) a/l_p + R_{\Pi} (l_p + c)/l_p.$$

Здесь F_{Π} — центробежная сила дисбаланса,

$$F_{\Pi} = G \omega^2/g,$$

где e — удельная остаточная неуравновешенность. Реакции опор учитывают при расчете подшипников.

3. Определяют изгибающие моменты $M_{из}$ (Н·м):

на участке a $M_{из} = R_A x_n$, где x_n — расстояние от рассматриваемого сечения до места приложения реакции R_A ;

на участке b $M_{из} = R_p(c + y_n) + R_B y_n$;

на участке c $M_{из} = R_p z_n$.

4. Определяют моменты сопротивления (м^3) при изгибе для каждого участка вала

$$w_n = 0,1 d_n^3,$$

где d_n — диаметр расчетного участка вала, м.

5. Рассчитывают касательное напряжение для каждого участка вала. Касательное напряжение (Па) в сечении вала, отстоящем от точки приложения изгибающей силы на расстояние x ,

$$\sigma = \sqrt{M_{из}^2 + (k_p M_{вр})^2 / w},$$

где $M_{из}$ — изгибающий момент, Н·м; k_p — коэффициент перегрузки, $k_p = 1,5 \div 3$; $M_{вр}$ — момент, передаваемый на исполнительный механизм, Н·м.

По наибольшему значению σ проверяют пригодность принятого материала вала. Необходимо, чтобы $\sigma \ll \sigma_{\text{доп}}$. Методика определения $\sigma_{\text{доп}}$ приведена выше.

Определение критической частоты вращения ротора. В связи с тем, что валы на опорах являются упругой системой, возможны крутильные и поперечные колебания. Частота вращения, соответствующая частоте собственных колебаний вала, называется критической. Необходимо, чтобы критическая частота вращения составляла не менее 1,3 номинальной частоты вращения. Для определения критической скорости составляют расчетную схему, отбросив конструктивные подробности, не имеющие значения [40].

При составлении расчетной схемы ротора, заменяющей реальную конструкцию, принимают следующие допущения:

1) подшипники рассматривают как жесткие шарнирные опоры, для более точных расчетов можно учесть податливость опор, приняв коэффициенты податливости опор $\alpha = (5 \div 10) 10^{-9}$ м/Н;

2) детали ротора, установленные на вал, являются абсолютно жесткими.

Если деталь имеет длину $l < R$ (радиуса цилиндрической части), то деталь можно рассматривать как тонкий диск. Детали ротора характеризуются моментом инерции относительно оси инерции (иначе осевым моментом инерции) J_o и моментом инерции относительно экваториальной оси, перпендикулярной оси вращения и проходящей через центр массы (экваториальным моментом инерции) J_e . Если осевой и экваториальный моменты инерции отличаются друг от друга менее чем на 25—30%, то в расчетной схеме эта часть ротора принимается в виде точечной массы, сосредоточенной в центре массы.

Для цилиндра (втулки) осевой момент инерции ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$)

$$J_o = 0,125m(d_1^2 + d_0^2);$$

экваториальный момент инерции (кг·м²)

$$J_3 = 0,5J_0 + 0,083ml^2.$$

Здесь m — масса цилиндра, кг,

$$m = 0,785 (d_1^2 - d_0^2) l \rho,$$

где d_1 — наружный диаметр цилиндра (втулки), м; d_0 — внутренний диаметр втулки, м; l — длина цилиндра (втулки), м; ρ — плотность материала, кг/м³.

Для тонкого диска моменты инерции:

$$J_0 = 0,125m (d_1^2 + d_0^2); \quad J_3 = 0,5J_0,$$

где d_1 и d_0 — наружный диаметр диска и диаметр отверстия в нем; m — масса диска.

При объединении расположенных рядом диска и втулки в одну массу следует принять, что общая масса $M = M_{\text{в}} + M_{\text{д}}$, общий осевой момент инерции $J_0 = J_{0,\text{в}} + J_{0,\text{д}}$.

Положение общего центра массы определяется из соотношения

$$M_{\text{в}}x_{\text{в}} = M_{\text{д}}x_{\text{д}},$$

где $x_{\text{д}}$ и $x_{\text{в}}$ — расстояния центров масс диска и втулки до общего центра масс.

Общий экваториальный момент инерции относительно общего центра масс

$$J_3 = J_{3,\text{в}} + M_{\text{в}}x_{\text{в}}^2 + J_{3,\text{д}} + M_{\text{д}}x_{\text{д}}^2.$$

Обычно масса магнитопроводящих деталей СММ велика, больше массы вала. Поэтому в расчетах масса вала может не учитываться. При составлении расчетной схемы принимают те же упрощения, что при расчете на жесткость. С учетом принятых допущений схемы валов СММ могут иметь разновидности, показанные на рис. 3.34. При расчете критической частоты вращения ротора число степеней свободы равно числу координат, определяющих перемещения всех расчетных масс в плоскости изгиба. Число опор не влияет на количество степеней свободы.

Перемещение точечных масс характеризуется прогибом, дисков — прогибом (перемещением центра массы) и углом поворота сечения вала (центробежной оси диска).

Для схемы вала по рис. 3.34, а система уравнений прогибов имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = \alpha_{11}m_1\lambda^2y_1 + \alpha_{12}m_2\lambda^2y_2 + \alpha_{13}m_3\lambda^2y_3; \\ y_2 = \alpha_{21}m_1\lambda^2y_1 + \alpha_{22}m_2\lambda^2y_2 + \alpha_{23}m_3\lambda^2y_3; \\ y_3 = \alpha_{31}m_1\lambda^2y_1 + \alpha_{32}m_2\lambda^2y_2 + \alpha_{33}m_3\lambda^2y_3, \end{array} \right\}$$

где y_1 , y_2 , y_3 — прогибы валов в точках расположения масс m_1 , m_2 , m_3 ; λ — искомая критическая частота вращения; α_{is} — коэффициенты податливости (перемещения от единичных сил), причем $\alpha_{is} = \alpha_{si}$. Индексы показывают номер сечений, где измеряются перемещения и приложены единичные силы.

Частотное уравнение системы в матричном виде

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11}m_1 - x & \alpha_{12}m_2 & \alpha_{13}m_3 \\ \alpha_{21}m_1 & \alpha_{22}m_2 - x & \alpha_{23}m_3 \\ \alpha_{31}m_1 & \alpha_{32}m_2 & \alpha_{33}m_3 - x \end{vmatrix} = 0,$$

где $x = 1/\lambda^2$. Отсюда определяют x , а затем и λ . При двух степенях свободы вала третьей строки и столбца в определителе нет.

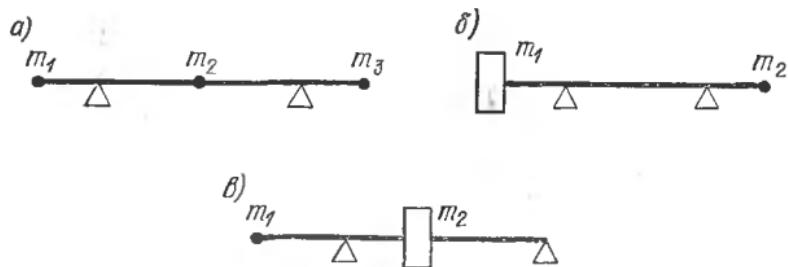


Рис. 3.34. Схемы валов СММ с тремя степенями свободы в плоскости изгиба:

● — точечная масса; □ — масса в виде диска

Для валов, показанных на рис. 3.34, б и в, система уравнений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \alpha_{11}m_1\lambda^2y_1 + \alpha_{12}m_2\lambda^2y_2 + \alpha_{13}J_{23}A\lambda^2\theta_2; \\ y_2 &= \alpha_{21}m_1\lambda^2y_1 + \alpha_{22}m_2\lambda^2y_2 + \alpha_{23}J_{23}A\lambda^2\theta_2; \\ \theta_2 &= \alpha_{31}m_1\lambda^2y_1 + \alpha_{32}m_2\lambda^2y_2 + \alpha_{33}J_{23}A\lambda^2\theta_2, \end{aligned} \right\}$$

где θ_2 — угол поворота сечения вала с диском; J_{23} — экваториальный момент инерции диска; α_{33} — податливость вала на скручивание под действием единичного момента; A — коэффициент прецессии,

$$A = 1 - \frac{J_o}{J_3} \frac{\lambda}{\omega};$$

ω — частота вращения ротора.

При $\lambda = \omega$ $A = 1 - J_o/J_3$, для тонких дисков $A = -1$. Частотное уравнение для схем на рис. 3.34, б и в

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11}m_1 - x & \alpha_{12}m_2 & \alpha_{13}J_{23}A \\ \alpha_{21}m_1 & \alpha_{22}m_2 - x & \alpha_{23}J_{23}A \\ \alpha_{31}m_1 & \alpha_{32}m_2 & \alpha_{33}J_{23}A - x \end{vmatrix} = 0.$$

Если $J_3 < J_0$, то система имеет две критические частоты. Если обозначить $a_{is} = \alpha_{is} m_s$ и $a_{is} = \alpha_{is} J_{3s} A$, частотное уравнение примет вид

$$\begin{vmatrix} a_{11} - x & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - x & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - x \end{vmatrix} = 0.$$

Отсюда определитель

$$x^3 - ax^2 + bx - c = 0,$$

где

$$a = a_{11} + a_{22} + a_{33};$$

$$b = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix};$$

$$c = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

Корни кубического уравнения определяют x , а следовательно, и λ . Если один из корней отрицателен, то одна из частот — мнимая. Расчет следует производить с точностью до четырех знаков.

Расчет коэффициентов податливости, необходимый для вычисления коэффициентов a , b и c , производят методом Верещагина. Для этого рассматривают схему ротора и в центрах масс прикладывают единичные силы, а к дискам — единичные изгибающие моменты. Для каждой единичной нагрузки строят на сжатых волокнах вала эпюры изгибающих моментов. Затем определяют сумму произведений элементов площади эпюры i на ординаты эпюры S , находящиеся против центра тяжести элемента площади i -й эпюры. Разделив эту сумму на жесткость вала EJ , определяют коэффициент податливости α_{is} .

Рассмотрим пример определения α_{is} для ротора по схеме, показанной на рис. 3.34, б. Построение эпюр показано на рис. 3.35.

Коэффициент податливости α_{11} определяют по эпюре в виде

$$\alpha_{11} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_1^2 \frac{2}{3} l_1 + \frac{1}{2} l_1 L \frac{2}{3} l_1 \right) = \frac{l_1^2}{3EJ} (l_1 + L);$$

α_{12} определяют по эпюрам в виде

$$\alpha_{12} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_1 L \frac{1}{3} l_2 \right) = \frac{l_1 l_2 L}{6EJ};$$

α_{13} определяется по эпюрам в виде

$$\alpha_{13} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} l_1^2 + \frac{1}{2} l_2 \frac{2}{3} L \right) = \frac{l_1}{2EJ} \left(l_1 + \frac{2}{3} L \right).$$

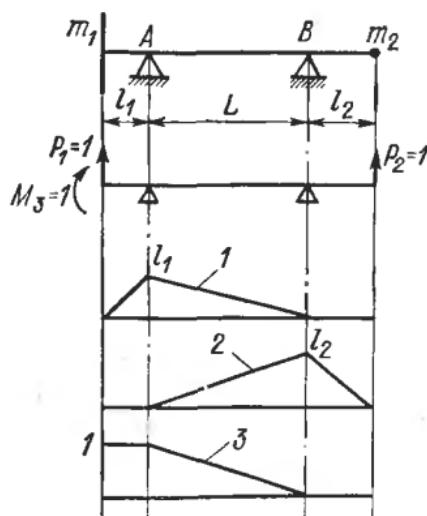


Рис. 3.35. Схема ротора и построение эпюр изгибающих моментов от единичных нагрузок: 1, 2, 3—эпюры действия P_1 , P_2 , M_3

Аналогично

$$\alpha_{22} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{2} L l_2 \frac{2}{3} l_2 + \frac{1}{2} l_2^2 \frac{2}{3} l_2 \right) = \frac{l_2^2}{3EJ} (L + l_2);$$

$$\alpha_{23} = \frac{1}{EJ} \frac{1}{2} L \frac{1}{3} l_2 = \frac{L l_2}{6EJ};$$

$$\alpha_{33} = \frac{1}{EJ} \left(l_1 + \frac{1}{2} L \frac{2}{3} \right) = \frac{1}{EJ} \left(l_1 + \frac{1}{3} L \right).$$

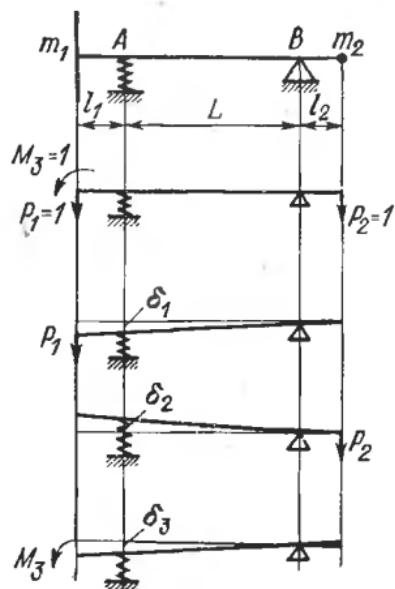


Рис. 3.36. Схема ротора с упругой опорой

Возможен вариант расчета с учетом податливости опоры, например опоры A ротора. Схема ротора и перемещений вала показана на рис. 3.36. В этом случае к валу прикладывают те же нагрузки, что и выше. Считая, что вал абсолютно жесткий, определяют перемещения точки A от единичных нагрузок вследствие ее податливости.

Перемещения составляют:

$$\text{от } P_1 \quad \delta_1 = \frac{l_1 + L}{L} \alpha_a; \quad P_2 \quad \delta_2 = \frac{l_2}{L} \alpha_a;$$

$$M_3 \quad \delta_3 = \frac{1}{L^2} \alpha_a.$$

Соответственно этому

$$a'_{11} = a_a \frac{(l_1 + L)^2}{L^2}; \quad a'_{12} = -a_a \frac{l_1 + L}{L^2} l_2;$$

$$a'_{13} = a_a \frac{l_1 + L}{L^2}; \quad a'_{22} = a_a \frac{l_2^2}{L^2};$$

$$a'_{23} = -a_a \frac{l_2}{L^2}; \quad a'_{33} = a_a \frac{1}{L^2}.$$

Дополнительные перемещения из-за упругости опоры определяют из матрицы

$$a'_{is} = \begin{vmatrix} a'_{11} & a'_{12} & a'_{13} \\ a'_{21} & a'_{22} & a'_{23} \\ a'_{31} & a'_{32} & a'_{33} \end{vmatrix}.$$

Заметим, что $a'_{13} = a'_{21}$, $a'_{13} = a'_{31}$, $a'_{23} = a'_{32}$ и матрицу суммарных коэффициентов податливости определяют в результате сложения $a_{is} + a'_{is}$.

Для схемы ротора (см. рис. 3.34, б) приближенно критическую частоту вращения (об/мин) можно определить по формуле

$$\lambda \approx 300 \sqrt{(1 - f_{\infty, 0}/e_0)/f_0}.$$

3.10 РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПОЛУМУФТ

Постоянные магниты обладают низкой механической прочностью, и диаметральные их размеры при размещении во вращающихся частях механизмов ограничены значениями, приведенными в п. 1.1. При необходимости превышения указанных размеров на магнит должна быть надета прочностная втулка, препятствующая разрыву магнита центробежными силами (см. табл. 1.1, схемы 1, 7). При размещении магнита в наружных частях роль прочностной втулки играет корпус (см. табл. 1.1, схемы 2, 5, 6).

Напряжения во втулке складываются из напряжений (Па) от центробежных сил магнита σ_m и собственных σ_c :

$$\sigma_m = \frac{\rho \omega^2 (r - r_0)^2 r}{2(R - r)};$$

$$\sigma_c = \rho_b \omega^2 R^2.$$

Здесь ρ — плотность магнита, кг/м³; ω — угловая частота вращения, 1/с, $\omega = \pi n / 30$; r — внешний радиус магнита, м; r_0 — внутренний радиус магнита, м; R — внешний радиус втулки, м; ρ_b — плотность материала втулки, кг/м³.

Суммарное напряжение, действующее на втулку,

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_m + \sigma_c.$$

Для наружной полумуфты с внутренними зубцами напряжения от центробежных сил

$$\sigma_n = \rho^* \omega^2 R_{n.p.},$$

где $R_{n.p.}$ — внешний радиус полумуфты; ρ^* — приведенная плотность с учетом зубцов,

$$\rho^* = \rho \left(1 + \frac{F_z}{2\pi r h} \right);$$

r — радиус дна пазов; h — толщина полумуфты, $h = R_{n.p.} - r$; F_z — площадь всех зубцов.

3.11 РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

Работоспособность и ресурс работы СММ в значительной степени определяют подшипниковые узлы. Обычно в СММ используют подшипники качения, обеспечивающие точную центровку валов, способные работать при температурах в диапазоне от -270 до $+500^\circ\text{C}$.

В СММ используют шариковые подшипники: однорядные радиальные, радиально-упорные и однорядные упорные, а также конические роликовые. Назначение подшипников: однорядные радиальные шариковые несут преимущественно радиальную нагрузку, но могут воспринимать и ограниченную осевую; радиально-упорные шариковые несут одновременно осевую и радиальную нагрузки; конические роликовые несут высокие радиальные и осевые нагрузки; однорядные шариковые упорные воспринимают только осевую нагрузку в одном направлении, используются в сочетании с радиальными шариковыми подшипниками. Для несения увеличенных осевых и радиально-осевых нагрузок, а также при необходимости нанесения на беговые дорожки твердой

смазки целесообразно применение разъемных шариковых радиально-упорных подшипников или шариковых подшипников с разъемной в экваториальной плоскости наружной или внутренней обоймой. Разъемные обоймы следует стягивать крепежными деталями.

По соотношению наружного и внутреннего диаметров подшипника и его ширины подшипники выпускают особо легкой, легкой, легкой широкой, средней, средней широкой и тяжелой серий.

Допустимую частоту вращения подшипников определяют по условной окружной скорости $v_{окр}$ (м/с) по центральной линии тел качения или по среднему диаметру подшипника

$$v_{окр} \approx 5 \cdot 10^{-5} n d_{ср},$$

где n — частота вращения, об/мин; $d_{ср}$ — средний диаметр подшипника, мм, $d_{ср} = 0,5(D + d)$; D — наружный диаметр подшипника, мм; d — внутренний диаметр подшипника, мм.

Т а б л и ц а 3.22. Значения коэффициентов трения

Подшипник	Коэффициент трения μ		Допустимая окружная скорость $v_{окр}$, м/с	$nd_{ср} \cdot 10^6$, об·мм/мин
	при радиальной нагрузке	при осевой нагрузке		
Шариковый радиальный	0,001—0,002	0,002—0,003	10—30	0,2—0,6
Шариковый радиально-упорный	0,002—0,003	0,0025—0,004	10—20	0,2—0,4
Роликовый конический	0,004—0,008	0,01—0,02	5—15	0,1—0,3
Шариковый упорный	—	0,004—0,006	5—10	0,1—0,2

Значения коэффициента трения μ , $v_{окр}$ и $nd_{ср}$ для различных видов подшипников приведены в табл. 3.22. Значения максимально допустимой частоты вращения указаны в каталожных данных.

По ГОСТ 18854—73 и ГОСТ 18855—73 долговечность подшипников L_h (ч) определяется зависимостью

$$L_h = \frac{10^5}{6n} \left(\frac{C}{P} \right)^p,$$

где n — частота вращения, об/мин, при $n \ll 10$ в формуле используется значение $n = 10$; C — динамическая грузоподъемность, Н, используется при $n \geq 10$ (при $n < 10$ используется статическая грузоподъемность C_0 , Н); P — эквивалентная нагрузка, Н; p — показатель степени, $p = 3$ для шарикоподшипников, $p = 3\frac{1}{3}$ для роликоподшипников.

Выбранный подшипник должен иметь долговечность больше или равную расчетной. Величина требуемой долговечности определяется функциональным назначением устройства. Обычно принимают следующие значения долговечности (ч):

Периодически работающие механизмы	500
Устройства, работающие кратковременно	≥ 4000
Механизмы, работающие с перерывами	≥ 8000
Механизмы, работающие одновременно с неполной нагрузкой	≥ 12000
Механизмы, работающие в одну смену с полной нагрузкой	20 000
Устройства круглосуточного использования	≥ 40000
Непрерывно работающие устройства	≥ 100000

Следует отметить, что долговечность подшипников должна быть согласована с долговечностью машины в целом исходя из условий эксплуатации.

Эквивалентная нагрузка P :

для радиальных и радиально-упорных шарико- и роликоподшипников

$$P = (xk_v R + yF_a) k_\delta k_t;$$

для упорных подшипников

$$P = F_a k_\delta k_t,$$

где R — радиальная нагрузка, определяемая при расчете вала, Н; F_a — осевая нагрузка, Н; x и y — коэффициенты радиальной и осевой нагрузок (табл. 3.23); k_v — коэффициент вращения, при вращении внутреннего кольца $k_v = 1,0$; наружного — $k_v = 1,2$; k_δ — коэффициент безопасности; k_t — температурный коэффициент.

Значения коэффициента k_δ в зависимости от характера нагрузки:

Характер нагрузки	k_δ
Спокойный, без толчков	1,0
Легкие толчки, перегрузки до 125% от名义альной	1,0—1,2
Умеренные толчки, вибрации, перегрузки до 150% от名义альной	1,3—1,5
То же при повышенной надежности	1,5—1,8
Значительные толчки, вибрации, перегрузки до 200% от名义альной	1,8—2,5
Нагрузки с сильными ударами, перегрузки до 300% от名义альной	2,5—3,0

Таблица 3.23. Значения коэффициентов радиальной и осевой нагрузок x и y для однорядных подшипников

Подшипник	F_a/C_0	F_a/R	x	y
Радиальный	0,014 0,028 0,056 0,084 0,11 0,17 0,28 0,42 0,56	0,19 0,22 0,26 0,28 0,30 0,34 0,38 0,42 0,44	0,56	2,30 1,99 1,71 1,55 1,45 1,31 1,15 1,04 1,00
Радиально-упорный: $\alpha = 12^\circ$	0,014 0,029 0,057 0,086 0,11 0,17 0,29 0,43 0,57	0,30 0,34 0,37 0,41 0,45 0,48 0,52 0,54 0,54	0,45	1,81 1,62 1,46 1,34 1,22 1,13 1,04 1,01 1,00
$\alpha = 26^\circ$	—	0,68	0,41	0,87
$\alpha = 36^\circ$	—	0,95	0,37	0,66

Значения температурного коэффициента k_T при рабочей температуре подшипника, $^{\circ}\text{C}$:

	k_T
125	1,05
150	1,10
175	1,15
200	1,25
225	1,35
250	1,40

Осевая нагрузка F_a для радиальных и упорных подшипников определяется внешними силами, действующими на вал. В радиально-упорных подшипниках радиальные нагрузки вызывают появление

Таблица 3.24. Долговечность шариковых подшипников L_h

$Lh, ч$									
	10	40	100	160	200	250	320	400	500
100	—	—	—	—	1,06	1,15	1,24	1,34	1,45
500	—	1,06	1,45	1,68	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47
1 000	—	1,34	1,82	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11
1 250	—	1,45	1,96	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36
1 600	—	1,56	2,12	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63
2 000	1,06	1,68	2,29	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91
2 500	1,15	1,82	2,47	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23
3 200	1,24	1,96	2,67	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56
4 000	1,34	2,12	2,88	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93
5 000	1,45	2,29	3,11	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32
6 300	1,56	2,47	3,36	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75
8 000	1,68	2,67	3,63	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20
10 000	1,82	2,88	3,91	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70
12 500	1,96	3,11	4,23	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23
16 000	2,12	3,36	4,56	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81
20 000	2,29	3,63	4,93	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43
25 000	2,47	3,91	5,32	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11
32 000	2,67	4,23	5,75	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83
40 000	2,88	4,56	6,20	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,1
50 000	3,11	4,93	6,70	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5
63 000	3,36	5,32	7,23	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4
80 000	3,63	5,75	7,81	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4
100 000	3,91	6,20	8,43	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5
200 000	4,93	7,81	10,6	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2

в зависимости от C/P и частоты вращения n n , об/мин

630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300
1,56	1,68	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36
2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75
3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23
3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81
3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43
4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11
4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83
4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6
5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5
5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4
6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4
6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5
7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6
7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8
8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2
9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6
9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2
10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9
11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7
12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7
13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8
14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1
15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1	—
19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1	—	—	—	—

осевые составляющих S . Значения их для радиально-упорных шарикоподшипников

$$S = e_{rc} R.$$

Здесь коэффициент $e_{rc} = f(\alpha)$, где α — угол контакта.

$$\text{При } \alpha = 12^\circ \quad \lg e_{rc} = \left(\lg \frac{R}{C_0} - 1,144 \right) / 4,729;$$

при $\alpha = 26^\circ \quad e_{rc} = 0,68$;

при $\alpha = 36^\circ \quad e_{rc} = 0,95$.

Для радиально-упорных роликовых подшипников

$$S = 1,245R \operatorname{tg} \alpha.$$

Зная радиальные силы, действующие в опорах, и внешние осевые нагрузки A , определяют значения F_a для каждого из подшипников механизма.

Подшипники могут быть установлены в распор (при этом силы S направлены встречно вдоль вала) и врастяжку (при этом силы S направлены противоположно вдоль вала). Вследствие этого сила F_a является суммой или разностью сил A и S .

При выборе подшипника по конструктивным соображениям необходимо произвести проверочный расчет. Необходимо, чтобы у выбранного подшипника $C > C_p$, где C — номинальная динамическая грузоподъемность по паспортным данным; C_p — расчетное или требуемое значение.

Величина C_p определяется из формулы для L_h решением ее относительно C . Для упрощения расчетов можно использовать соотношения между L_h , n и (C/P) , приведенные в табл. 3.24 и 3.25. В этом случае по заданным значениям L_h и n определяется (C/P) , а величина $C_p = (C/P) P$, где P известна.

Последовательность расчета радиальных шарикоподшипников.

1. Определяются исходные данные подшипникового узла — нагрузки F_a и R , необходимые долговечность L_h , частота вращения n и коэффициенты k_v , k_δ и k_t .

2. Определяется соотношение F_a/R .

3. Принимаются значения x и y :

при $F_a/R < 0,19 \quad x = 1,00; y = 0$;

» $F_a/R > 0,44 \quad x = 0,56; y = 2,30$;

» $0,19 < F_a/R < 0,44 \quad x = 0,56; y$ — из табл. 3.23 (чем больше значение F_a/R , тем больше значение y).

4. Определяется значение P .

5. По табл. 3.24 определяется величина (C/P) .

6. Рассчитывается требуемая динамическая грузоподъемность $C_p = (C/P) P$.

7. По каталожным данным выбирается типоразмер подшипника.

8. Проверяется значение C_p : по значению F_a/C_0 определяются значения x и y ; вычисляются значения P и C_0 ; сравнивается полученное значение C_p с табличным значением C .

Выбор радиально-упорных подшипников производится подбором по конструктивным соображениям с последующей проверкой расчетом.

Таблица 3.25. Долговечность роликовых подшипников L_h
в зависимости от C/P и частоты вращения n

L_h , ч	n , об/мин													
	10	16	23	40	63	100	125	160	200	250	320	400	500	630
100	—	—	—	—	—	—	—	—	1,05	1,13	1,21	1,30	1,39	1,49
500	—	—	—	1,05	1,21	1,39	1,49	1,71	1,83	1,97	2,11	2,26	2,42	2,59
1 000	—	—	1,13	1,30	1,49	1,71	1,83	1,97	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97
1 250	—	1,05	1,21	1,39	1,60	1,83	1,97	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19
1 600	—	1,13	1,30	1,49	1,71	1,97	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42
2 000	1,05	1,21	1,39	1,60	1,83	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66
2 500	1,13	1,30	1,49	1,71	1,97	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92
3 200	1,21	1,39	1,60	1,83	2,11	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20
4 000	1,30	1,49	1,71	1,97	2,26	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50
5 000	1,39	1,60	1,83	2,11	2,42	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82
6 300	1,49	1,71	1,97	2,26	2,59	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17
8 000	1,60	1,83	2,11	2,42	2,78	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54
10 000	1,71	1,97	2,26	2,59	2,97	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94
12 500	1,83	2,11	2,42	2,78	3,19	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36
16 000	1,97	2,26	2,59	2,97	3,42	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81
20 000	2,11	2,42	2,78	3,19	3,66	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30
25 000	2,26	2,59	2,97	3,42	3,92	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82
32 000	2,42	2,78	3,19	3,66	4,20	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38
40 000	2,59	2,97	3,42	3,92	4,50	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98
50 000	2,78	3,19	3,66	4,20	4,82	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62
63 000	2,97	3,42	3,92	4,50	5,17	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3
80 000	3,19	3,66	4,20	4,82	5,54	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0
100 000	3,42	3,92	4,50	5,17	5,94	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8
200 000	4,20	4,82	5,54	6,36	7,30	8,38	8,98	9,62	10,3	11,00	11,8	12,7	13,6	14,6

4

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СММ

4.1

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАГНИТНО-МЯГКИЕ СТАЛИ

Конструкционные магнитно-мягкие стали используются в СММ для выполнения элементов конструкции и магнитопроводов. В качестве магнитопроводов целесообразно использование низкоуглеродистых марок сталей (Ст0, Ст3, Ст5, 10). Использование других сталей в качестве магнитопроводов также возможно, если это обусловлено требованиями прочности деталей, однако они имеют более высокие удельные потери намагничающей силы. Кроме того, с увеличением содержания углерода в стали увеличивается остаточная намагниченность, что следует учитывать в системах с большим быстродействием включения—отключения.

Использование для магнитопроводов технически чистого железа — стали марки 03 (Армко, ЧМТУ 1-84—67) целесообразно лишь в специальных случаях. Температура точки Кюри (потери магнитных свойств) стали 03 — 770° С. В табл. 4.1 приведены физические и механические свойства магнитно-мягких конструкционных сталей [21, 22], а в табл. 4.2 — кривые намагничивания сталей.

4.2

КОНСТРУКЦИОННЫЕ НЕМАГНИТНЫЕ СТАЛИ

Конструкционные немагнитные стали используются в СММ для изготовления экранов, корпусов постоянных магнитов, деталей конструкций, формирующих магнитный поток.

В ряде случаев кроме требования свойства немагнитности к материалам предъявляются требования высоких механических свойств и коррозионной стойкости. Немагнитные стали, используемые для экранов, испытывают напряжения от перепада давлений между полостями ведущей и ведомой частей механизма; во вращающихся деталях и прочностных бандажах — от центробежной нагрузки. При наличии под экраном агрессивной среды экран должен быть коррозионностоек. Детали механизма, изготовленные из [магнитомягких] сталей, защищаются от коррозии плакированием или оболочками из коррозионностойких сталей.

В табл. 4.3 приведены физические и механические свойства немагнитных сталей [21]. Стали обладают высокой коррозионной стойкостью в кислотах, морской воде, окислительных средах, шелочах. Помимо сталей, указанных в табл. 4.3, возможно применение сталей 40Х4Г18 ($\sigma_t = 490$ МПа, $\sigma_b = 680$ МПа), 4Х12Н8Г8МФБ ($\sigma_b = 590$ МПа, $\sigma_b = 830$ МПа), 30Х2Н25 ($\sigma_t = 440$ МПа, $\sigma_b = 980$ МПа).

Таблица 4.1. Физические и механические

Свойство	Марка							
	03	Ст0	Ст2сп	Ст3сп		Ст5сп		
Плотность $\rho \times 10^{-3}$, кг/м ³	7,88	7,85	7,85	7,85		7,85		
Термообработка	—	Г	Г	Г	Н	Г	Н	О
Предел текучести σ_t , МПа	—	—	200	230	200	260	220	200
Предел прочности σ_b , МПа	280—450	310	340	380	400	500	440	400
Свариваемость	б. о	б. о	б. о	б. о		о		
Вид сварки	—	РДС; ЭШС	РДС; ЭШС	РДС; ЭШС		РДС; ЭШС		
Средний коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $(^{\circ}\text{C})^{-1}$, в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$:								
20—100	11,6 при 0°C	11,6	11,6	11,6		11,6		
20—200	—	—	—	—		—		
20—300	—	—	—	—		—		
20—400	—	—	—	—		—		
Теплопроводность λ , Вт/(м· $^{\circ}\text{C}$), при температуре, $^{\circ}\text{C}$:								
20	71,5	71,5	71,5	71,5		71,5		
100	—	—	—	—		—		
200	—	—	—	—		—		
300	—	—	—	—		—		
400	—	—	—	—		—		

свойства конструкционных сталей

стали

08	10	15	20	30
7,83	7,83	7,85	7,85	7,85
Н 200	Н 210	3; О 250	Н 180	О 150
330	340	400	360	330
б. о РДС; ЭШС	б. о РДС; ЭШС	б. о РДС; ЭШС	б. о РДС; ЭШС	о РДС; ЭШС
11,6	11,6	11,9	11,1	11,1
12,6	12,6	12,5	12,1	11,9
13,0	13,0	13,0	12,7	—
9,68	13,0	13,6	13,4	13,4
—	—	—	—	50,7
80,9	60,0	60,0	50,7	—
69,1	52,8	52,8	48,6	48,6
—	44,8	—	46,1	—
51,5	37,7	44,8	42,3	42,3

Свойство	Марка				
	03	Ст0	Ст2сп	Ст3сп	Ст5сп
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг× \times °C), при температуре, °C:					
20	460	460	460	460	460
100	—	—	—	—	—
200	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	—
400	—	—	—	—	—
Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, МПа, при температуре, °C:					
20	210	210	210	210	210
100	—	—	—	—	—
200	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	—
400	—	—	—	—	—
Свойство	Марка				
	40		45		60
Плотность $\rho \times 10^{-3}$, кг/м ³	7,81		7,85		7,80
Термообработка	H	H; O	3; O	H	H; O
Предел текучести σ_t , МПа	340	250	280	360	250
					350
Предел прочности σ_b , МПа	580	480	540	610	540
					600
Свариваемость	о		з		з
Вид сварки	РДС; ЭШС		РДС		РДС; ЭШС

стали	08	10	15	20	30
	—	—	—	—	—
465	465	469	469	469	469
478	478	482	482	482	482
—	—	—	—	—	545
511	511	524	536	536	524
207	207	202	202	202	204
211	211	187	187	187	200
186	186	—	179	179	195
156	156	170	170	170	189
144	144	157 при 450° С	161	161	—

стали	35ХМ	40ХН	30ХГСА	35ХГСА	40ХНМА	35ХН1М2ФА
	7,82	7,82	7,85	7,82	7,85	7,83
3; О	3; О	3; О	3; О	3, О	3 О	3 О
450	550; 1000 при Ø 60	1300 при Ø 30; 600 при Ø 60	1300	750	700	800
650	700; 1200 при Ø 60	1500 при Ø 30 750 при Ø 60	1650	900	850	950
О	з	о	о	з	—	—
РДС; АрДС; ЭШС	РДС; ЭШС	РДС; АрДС; ЭШС	РДС; АрДС; ЭШС	РДС	—	—

Марка

Свойство	40	45	60	40Х
Средний коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $(^{\circ}\text{C})^{-1}$, в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$:				
20—100	12,4	11,59	11,0	13,4
20—200	12,6	12,32	11,9	13,3
20—300	14,5	13,09	—	—
20—400	13,3	13,71	13,9	14,8
Теплопроводность λ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$, при температуре, $^{\circ}\text{C}$:				
20	—	—	—	—
100	59,5	48,2	67,4	46,1
200	53,2	46,5	53,2	42,7
300	46,9	44,0	—	39,4
400	41,1	41,1	36,0	35,6
Удельная теплопроводность c , $\text{Дж}/(\text{кг} \times ^{\circ}\text{C})$, при температуре, $^{\circ}\text{C}$:				
20	—	—	—	—
100	469	469	482	—
200	482	482	486	—
300	519	—	—	—
400	524	524	528	—
Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, МПа, при температуре, $^{\circ}\text{C}$:				
20	213	204	208	218
100	210	—	—	215
200	—	195	212	—
300	200	194	193	201
400	—	175	178	—

Примечание. Приняты обозначения: Г — горячекатаная, С — стаки; свариваемость: б. о — без ограничений, о — ограниченная, з — затруднена трошлаковая.

стали

35ХМ	40ХН	30ХГСА	35ХГСА	40ХНМА	35ХН1М2ФА
12,3	11,8	11,0	11,0	—	11,8
12,5	12,3	—	—	—	12,1
12,9	—	—	—	—	12,6
13,9	13,4	—	—	—	13,0
—	—	—	—	—	—
35,6	44,0	37,7	—	46,1	—
34,4	42,7	—	—	44,0	—
32,7	41,0	—	—	39,8	—
—	39,0	—	—	37,7	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
213	204	198	—	204	—
—	—	—	—	—	—
208	—	177	—	—	—
201	—	172	—	—	—
192	—	159	—	—	—

рение, Н — нормализация, З — закалка, О — отпуск, п — в состоянии поставки; вид сварки: РДС — ручная дуговая, АрДС — аргонодуговая, ЭШС — элек-

Таблица 4.2. Кривая намагничивания $B = f(H)$ сталей

Магнитная индукция B , Т	Напряженность H , А/см									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Литая сталь, толстые листы и поковки										
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,10	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,20	1,60	1,68	1,76	1,84	1,92	2,00	2,08	2,16	2,24	2,32
0,30	2,40	2,48	2,56	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,40	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,50	4,00	4,08	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79
0,60	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,70	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,80	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,90	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,50	8,73	8,85	8,98	9,11
1,00	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,04	10,22	10,39	10,56	10,73
1,10	10,90	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69
1,20	12,90	13,15	13,40	13,70	14,00	14,30	14,60	14,90	15,20	15,55
1,30	15,90	16,30	16,70	17,20	17,60	18,10	18,60	19,20	19,70	20,30
1,40	20,90	21,60	22,30	23,00	23,70	24,40	25,30	26,60	27,10	28,00
1,50	28,90	29,90	31,00	32,10	33,20	34,30	35,60	37,00	38,30	39,60
1,60	41,00	42,50	44,00	45,50	47,00	48,50	50,00	51,50	53,00	55,00
1,70	85,00	88,00	91,00	94,00	97,00	100,00	105,00	110,00	116,00	122,00

Магнитная индукция <i>B</i> , Т	Напряженность <i>H</i> , А/см									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Низкоуглеродистая сталь										
0	0	0,08	0,17	0,23	0,3	0,34	0,38	0,43	0,48	0,51
0,1	0,55	0,59	0,63	0,67	0,72	0,76	0,80	0,84	0,89	0,93
0,2	0,97	1,01	1,05	1,08	1,12	1,14	1,17	1,20	1,23	1,26
0,3	1,29	1,32	1,36	1,39	1,43	1,46	1,49	1,51	1,54	1,57
0,4	1,60	1,63	1,66	1,68	1,71	1,73	1,76	1,78	1,81	1,84
0,5	1,87	1,89	1,92	1,95	1,98	2,00	2,03	2,06	2,09	2,12
0,6	2,15	2,18	2,22	2,26	2,30	2,34	2,39	2,44	2,49	2,55
0,7	2,61	2,68	2,75	2,82	2,89	2,95	3,02	3,09	3,16	3,24
0,8	3,32	3,40	3,48	3,55	3,63	3,71	3,79	3,87	3,95	4,03
0,9	4,12	4,21	4,3	4,39	4,48	4,57	4,67	4,76	4,85	4,94
1	5,03	5,11	5,2	5,29	5,38	5,46	5,55	5,64	5,73	5,82
1,1	5,92	6,02	6,12	6,22	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72	6,82
1,2	6,92	7,02	7,12	7,22	7,32	7,42	7,52	7,61	7,70	7,80
1,3	7,90	8,01	8,12	8,22	8,32	8,41	8,50	8,60	8,70	8,80
1,4	8,90	9,00	9,10	9,21	9,32	9,42	9,52	9,62	9,73	9,84
1,5	10,50	11,00	11,60	12,40	13,2	14,20	15,20	16,60	17,80	19,30
1,6	20,90	22,50	24,20	26,40	28,8	31,00	34,00	37,00	39,80	42,60
1,7	46,00	49,00	52,00	57,00	62	67,00	72,00	77,00	82,00	87,00
1,8	92,00	98,00	105,00	111,00	118	125	132,00	138,00	145,00	152,00
1,9	160,00	168,00	177,00	186,00	195	203,00	212,00	220,00	229,00	239,00
2,0	250,00	260,00	270,00	281,00	292	303,00	314,00	326,00	338,00	351,00
2,1	365,00	380,00	395,00	410,00	425	440,00	455,00	460,00	485,00	500,00

Таблица 4.3. Физические и механические свойства
немагнитных конструкционных сталей

Свойство	Марка стали				
	X18H9 (X18H9)	0X18H10T	X18H10T (X18H9T)	X18H9T	X18H12T
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
Термообработка	п	п	з	п	п
Предел текучести σ_t , МПа	250	270	240	220	—
Предел прочности σ_b , МПа	540	520	540	500	540
Свариваемость	б. о	б. о	б. о	б. о	б. о
Вид сварки	РДС; АрДС; ЭШС	РДС; АрДС; ЭШС	РДС; ЭШС	РДС; ЭШС	РДС; ЭШС
Средний коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹ , в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$:					
20—100	—	—	16,6	16,6	16,6
20—200	—	—	17,0	17,0	17,0
20—300	—	—	17,2	17,2	17,2
20—400	—	—	17,5	17,5	17,5
Теплопроводность λ , Вт/(м $\cdot $ $^{\circ}\text{C}$), при температуре, $^{\circ}\text{C}$:					
20	—	—	15,1	15,1	15,1
100	—	—	16,3	16,3	16,3
200	—	—	17,6	17,6	17,6
300	—	—	18,8	18,8	18,8
400	—	—	21,4	21,4	21,4
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг $\cdot $ $^{\circ}\text{C}$), при температуре, $^{\circ}\text{C}$:					
20	—	—	461	461	461
100	—	—	494	494	494
200	—	—	515	514	514
300	—	—	536	536	536
400	—	—	549	549	549

Свойство	Марка стали				
	X18H9 (1X18H9)	0X18H10T	X18H10T (1X18H9T)	X18H9T	X18H12T
Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, МПа, при температуре, °C:					
20	—	—	202	202	202
100	—	—	198	198	198
200	—	—	193	193	193
300	—	—	185	185	185
400	—	—	177	177	177
Удельное сопро- тивление $\rho_3 \cdot 10^6$, Ом·м, при 20° С	0,72—0,81	0,72— 0,81	0,72	0,72	0,72

П р и м е ч а н и е. Принятые обозначения см. в табл. 4.1.

4.3 КОНСТРУКЦИОННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Титановые сплавы являются высокопрочными, немагнитными материалами, обладают высокой коррозионной стойкостью. В СММ они используются для изготовления экранов, прочностных деталей, корпусов и т. д.

Свойства титановых сплавов приведены в табл. 4.4, механические характеристики — на рис. 4.1 [14]. Титановые сплавы обладают жаропрочностью, могут работать в условиях глубокого вакуума и низких температур. Для работы при криогенных температурах могут быть использованы сплавы ОТ4, ВТ5-1, ВТ6С и ВТ14 (ВТ6С и ВТ14 — не ниже -196°C , ОТ4 и ВТ5-1 до -253°C).

Механические свойства сплавов при криогенных температурах приведены в табл. 4.5.

Титановые детали чувствительны к местным концентраторам напряжений.

Механическая обработка титановых сплавов аналогична обработке нержавеющих сталей. Следует учитывать низкую теплопроводность.

Таблица 4.4. Свойства

Свойство	ВТ5	ВТ5-1	ВТ4	ВТ6С	ВТ20	ВТ6
Допустимая темпера- тура, °С:						
длительно	400	450	450	350	500	400
кратковременно	750	850	800	700	800	750
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	4,400	4,420	4,520	4,450	4,450	4,430
Теплопроводность λ , Вт/(м·°C), при темпе- ратуре, °С:						
20	8,799	8,799	8,380	8,380	—	8,380
100	9,637	9,637	9,218	9,218	8,799	9,218
200	10,475	10,894	10,478	10,478	10,056	10,894
300	11,313	12,151	11,732	11,732	10,894	11,313
400	12,151	13,408	12,989	12,989	12,151	12,151
Удельная теплоем- кость c , Дж/(кг·°C), при температуре, °С:						
100	548,89	502,80	502,80	548,89	548,89	548,89
200	586,60	548,89	565,65	586,60	586,60	586,60
300	532,69	565,65	611,74	632,69	632,69	670,40
400	674,59	586,60	670,40	670,40	670,40	712,30
Средний коэффици- ент линейного расши- рения $\alpha \cdot 10^6$, (°C) ⁻¹ , в интервале температур, °С:						
20—100	8,3	8,5	8,40	8,4	8,8	8,4
100—200	8,9	9,3	9,00	9,0	—	9,3
200—300	9,5	9,7	9,05	9,6	—	9,8
300—400	10,4	10,0	9,05	10,2	—	10,1
400—500	10,6	10,3	—	10,8	—	—
Удельное электро- сопротивление $\rho_e \times$ $\times 10^6$, Ом·м, при 20°C	1,08	1,38	1,46	1,42	1,63	1,60
Термообработка: отжиг	×	—	×	×	—	×
закалка и старение	—	—	—	×	—	×

ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

BT14	BT16	BT3-1	BT23	BT15	BT22	OT4	AT3
400 750 4,520	350 450 4,650	450 700 4,500	500 600 4,570	250 750 4,890	300 750 4,650	400 750 4,550	400 450 4,500
8,380 9,218 10,475 11,732 12,989	10,056 10,894 12,151 13,408 14,665	7,961 8,799 10,056 11,313 12,151	8,380 9,637 11,313 12,151 13,408	6,704 7,961 9,637 11,313 12,989	8,380 9,218 10,475 11,732 13,408	9,637 10,475 11,313 12,151 13,408	— — — — —
502,80 548,89 586,60 632,69	481,85 502,80 548,89 586,60	460,90 502,80 548,89 620,12	548,89 620,12 632,69 670,40	502,80 548,89 586,60 632,69	544,70 586,60 632,69 670,40	502,80 565,65 632,69 670,40	— — — —
8,8 8,4 9,1 9,7 9,3	9,1 9,8 10,4 10,5 10,3	9,2 9,8 10,3 10,9 11,4	8,5 8,6 8,7 8,8 8,9	8,9 9,4 9,5 10,0 10,5	7,8 8,3 8,7 9,2 9,7	8,0 8,6 9,1 9,6 9,4	— — — — 8,2
1,59	1,11	1,36	1,27	1,55	1,53	—	1,35
X X (до Ø 60)	—	X X (до Ø 60)	X X	— X	X —	X —	X —

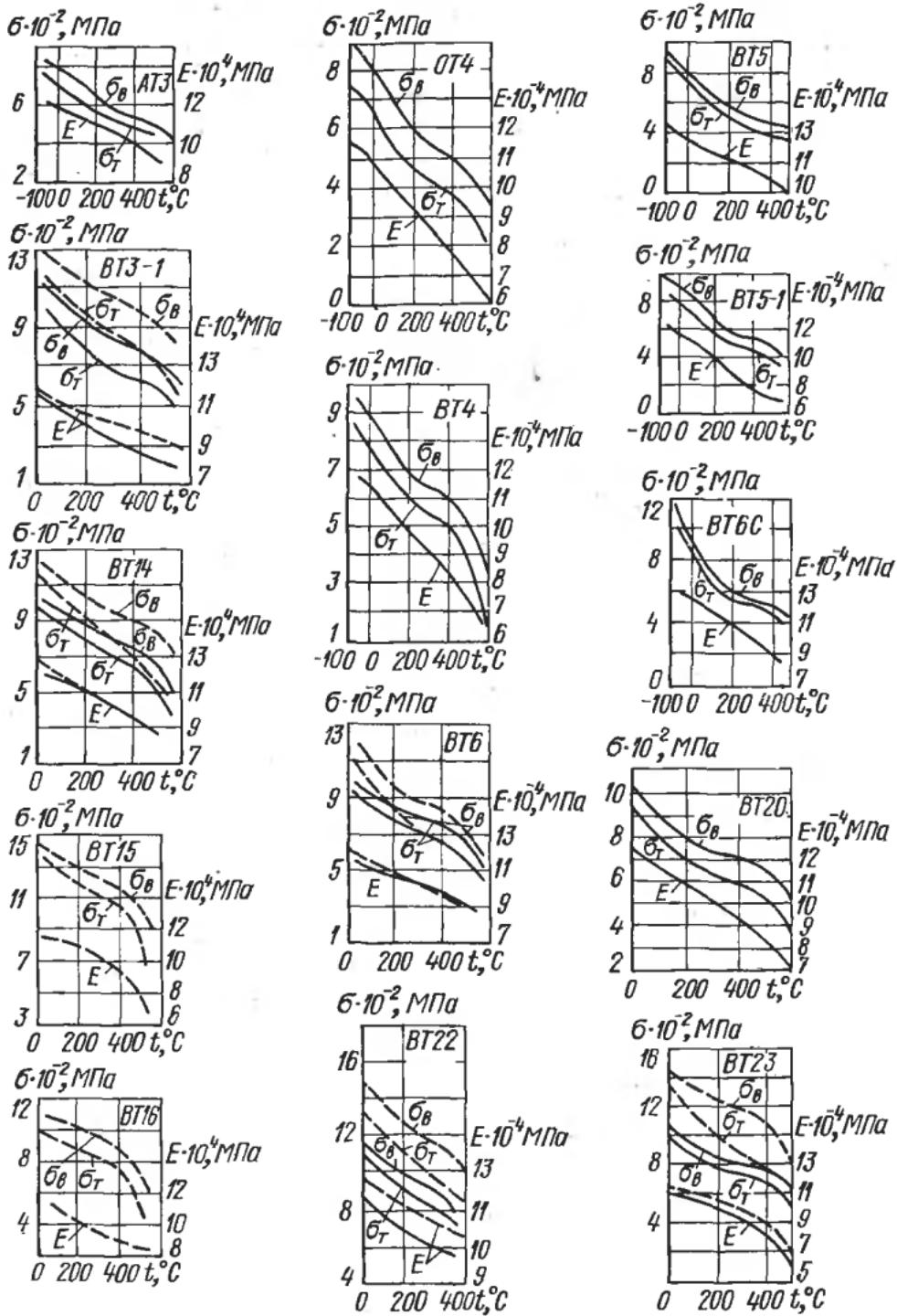


Рис. 4.1. Зависимость механических свойств титановых сплавов от температуры (— — отожженное состояние; — — термически упрочненное)

Таблица 4.5. Механические свойства сплавов при криогенных температурах

Марка сплава	σ_b , МПа		σ_t , МПа	
	при -196°C	при -253°C	при -196°C	при -253°C
ОТ4	1430	1560	1400	1410
ВТ5-1	1320	1580	1310	1400
ВТ6С	1310	—	1270	—
ВТ14	1440	—	1380	—

Инструмент целесообразно использовать с твердосплавными пластинками из сплавов ВК4, ВК8, ВК3 или из быстрорежущей стали Р9Ф5. Трудоемкость механической обработки в 2—2,5 раза выше, чем углеродистых сталей. Сплавы хорошо свариваются. Можно применять контактную, аргонодуговую или электрошлаковую виды сварки. Механические свойства сварных соединений хуже основного металла не более чем на 5—10%.

Сварные конструкции из титановых сплавов следует отжигать на воздухе для снятия напряжений при температуре, $^{\circ}\text{C}$:

Марка сплава

ОТ4, АТ3	545—585
ВТ4, ВТ5, ВТ5-1, ВТ6С, ВТ6	550—650
ВТ14, ВТ22, ВТ16, ВТ23	550—650
ВТ20	600—650

Для получения оптимальных физико-механических и технологических свойств детали и полуфабрикаты подвергают термической обработке (отжигу, закалке и старению). Для снятия внутренних напряжений в деталях и полуфабрикатах применяют неполный отжиг. Полный отжиг применяют для получения оптимальных технологических свойств (соотношения прочности и пластичности). Режимы отжига титановых сплавов приведены в табл. 4.6. Для придания высоких механических свойств деталям применяют упрочняющую термообработку (закалку и старение).

Примерные режимы упрочняющей термообработки приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.6. Режимы отжига титановых сплавов

Марка сплава	Температура отжига, °С		
	полного		неполного
	Листы	Прутки, поковки, штамповки	
Вт5	—	800—850	550—600
ВТ5-1	700—750	800—850	550—600
ОТ4	600—680	740—760	545—585
ВТ4	690—710	740—760	600—650
ВТ20	700—800	700—800	600—650
ВТ6С	750—800	750—800	600—650
ВТ6	750—800	750—800	600—650
ВТ14	740—760	740—760	550—650
ВТ16	730—770 *	770—790 *	520—550
ВТ22	740—760 **	680—800 **	550—650
ВТ15	790—810	790—810	550—650
ВТ23	740—760	740—760	550—650
ВТ3-1	—	870—920	530—620

П р и м е ч а н и е. Продолжительность полного отжига до 2 ч, неполного (после механической обработки) — от 0,5 до 2 ч.

* Охлаждение с печью 2—4° С в минуту до 500° С, затем на воздухе.

** Охлаждение с печью 2—4° С в минуту до 350° С, затем на воздухе.

Таблица 4.7. Режим упрочняющей термообработки

Марка сплава	Температура, °С		Длительность старения, ч
	Закалка	Старение	
ВТ6-С	880—980	450—510	2—4
ВТ6	900—950	450—550	2—4
ВТ14	870—910	480—560	8—16
ВТ16	810—830	560—580	8—10
ВТ22	690—750	480—540	8—16
ВТ15	780—900	480—500	15—25
		550—570	0,25
ВТ23	800—820	430—500	8—12
ВТ3-1	860—900	500—620	1—6

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

В СММ алюминий и его сплавы применяются как легкие конструкционные немагнитные материалы, используемые в основном для изготовления деталей методами механической обработки [22].

Области применения алюминиевых сплавов: АД и АД1 — для деталей, не несущих нагрузок, сплавы обладают хорошей свариваемостью, высоким сопротивлением коррозии и большой теплопроводностью; АМц — для сварных малонагруженых деталей, изготавляемых глубокой вытяжкой или гибкой; АМг2 — для сварных малонагруженых деталей; АМг3, АМг5, АМг5В, АМг6 — для сварных мало- и средненагруженых деталей с высокой коррозионной стойкостью; Д1 и Д1П — для деталей средней прочности; Д16 и Д16П — для деталей средней и повышенной прочности, не требующих высокой коррозионной стойкости; в сильно нагруженых деталях сплавы заменяются сплавом В95, используются при температуре до 250° С; АВ — для деталей средней прочности, изготавляемых штамповкой, сплав сваривается, но коррозионная стойкость сварных соединений ниже стойкости основного металла; АД31 и АД33 — для деталей сложной формы, изготавляемых штамповкой или прессовкой, сплавы имеют повышенный предел текучести, хорошо обрабатываются, полируются; АК6 и АК6-1 — для штампованных деталей сложной формы, имеющих среднюю прочность; В94 — для деталей, изготавляемых штамповкой; В95 и В95-1 — для нагруженых конструкций, работающих длительное время при температуре 100—120° С; В96 — для прессованных деталей; Д19 — для деталей, работающих при температуре до 250° С; Д20 — для нагруженых деталей сложной формы, изготавляемых штамповкой, сваркой, работающих при температурах 200—300° С, сплав обладает низкой коррозионной стойкостью; Д23 — для сильно нагруженых деталей, изготавляемых штамповкой или прессовкой, работающих длительно при температуре до 180° С.

Физические и механические свойства сплавов приведены в табл. 4.8. Коррозионные свойства алюминия и сплавов — в табл. 4.9. Защита от коррозии осуществляется плакированием или нанесением покрытий (гальванических или оксидных пленок).

Таблица 4.8. Физические и механические свойства алюминиевых сплавов

Свойства	Марка сплава														
	АД, 1АД		АМц			АМг2		АМг3				АВ			
	АДН	АДМ	АМнН	АМцП	АМцМ	АМг2П	АМг2М	АМг3П	АМг3М	АМг5М	АМг6М	Д1	АВТ1	АВТ	АВМ
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	2,67		2,73			2,67		2,67		2,65	2,64	2,8	2,7		
Термообработка															
Предел текучести σ_T , МПа	100	30	180	130	50	210	80	100	90	120	150	3; ЕС 250	3; ИС 280	3; ИС 120	—
Предел прочности σ_B , МПа	150	80	220	170	130	250	190	240	190	270	300	410	330	220	120
Средний коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹ , в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$:	(—50)—(+20)														
20—100			—			24		23,8		23,5	24,1	21,8	21,8	22	23,5
20—200			—			—		—		—	24,7	—	—	—	24,5
20—300			25			—		—		26,2	—	25	—	—	25,5
20—400			—			—		—		26,1	—	26,5	—	—	—
Теплопроводность λ , Вт/(м · $^{\circ}\text{C}$), при температуре, $^{\circ}\text{C}$:	25		179			142		146		117	117	176	176		
400			188			—		159		146	138	—	—	188	
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг · $^{\circ}\text{C}$), при температуре, $^{\circ}\text{C}$:	100		1090			—		880		920	920	920	800		
400			1300			—		1050		1050	1090	1050	960		
Удельное электросопротивление $\rho \cdot 10^6$, Ом · м, при 20° С	—		—			—		0,0496		0,0626	0,071	0,054	0,048 **;	0,055 **	

Свойства	Марка сплава								АД31		АД33					
	Д16		АК4		АК6		Д20		Д19		Д23		В95			
													АД31Г	АД31М	АД33Т1	АД33М
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	2,78		2,77		2,75		2,84		2,76		2,73		2,85		2,71	
Термообработка	З; ИС	О	З; ИС	З; ИС	З; ИС	З; ИС	З; ИС	З; ИС	З; ИС	З; ИС	З; ИС	З; ИС	—	З; ИС	—	
Предел текучести σ_T , МПа	380	100	320—360	300	250	300	540	530—550	210	50	270	270	50	50	50	
Предел прочности σ_B , МПа	520	220	390—430	420	400	440	600	660	240	50	320	320	130	130	130	
Средний коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹ , в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$:																
(−50)−(+20)	21,4		—	—	—	—	—	—	22,0	—	—	—	—	—		
20—100	—		21,8	21,4	22,6	20,3	24,0	23,6	—	—	—	—	—	—		
20—200	—		23,1	—	24,7	25,2	24,9	24,2	—	24,3	—	24,1	—	—		
20—300	24,7		24,9	—	27,3	—	26,0	26,2	—	—	—	—	—	—		
20—400	—		24,8	25,6	30,2	—	28,2	—	—	26,7	—	25	—	—		

Свойства	Марка сплава								АД31		АД33	
	Д16	АК4	АК6	Д20	Д19	Д23	В95	АД31Т	АД31М	АД33Т1	АД33М	
Теплопроводность λ , Вт/(м·°C), при температуре, °C:												
25	192	146	176	142	138	92	155	188			142	
400	—	—	—	146	172	104	—	188			—	
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·°C), при температуре, °C:												
100	920	840	800	—	880	960	—	920			942	
400	1170	1050	1010	—	1090	1300	—	1090			1050	
Удельное электросопротивление $\rho \cdot 10^6$, Ом·м, при 20°C	0,073 *; 0,044 **	0,05	0,041	0,061	0,061	0,0912	0,042	0,0344			0,0438	

П р и м е ч а н и я: 1. Модуль упругости $E = 71\,000$ МПа. 2. Принятые обозначения термообработки: З — закалка; ИС — искусственное старение; ЕС — естественное старение; О — отжиг.

* После отжига.

** После естественного или искусственного старения.

Таблица 4.9. Коррозионная стойкость алюминия и сплавов

Среда	Стойкость	
	Алюминий	Сплавы
Вода с углекислотой	+	+
Морская вода	++	++
Водяной сухой пар	+	+
Насыщенный водяной пар	++	++
Азот, сера	+	+
Йод, хром, фтор, бром	-	-
Соляная, серная, фосфорная, сернистая кислоты	-	-
Водные растворы	-	-
Азотная кислота	++	++
Углекислый калий	-	-
Соли ртути	-	-
Аммиак (растворы)	++	++
Щелочи	-	-
Бензин, бензол	+	+
Смеси бензина и спирта	-	++
Мыло, парафин, воск, стеарин, молочная кислота	+	++
Нитроглицерин, нафтол	++	++
Цианистые соединения	++	++
Продукты питания	+	++
Винная кислота	-	-

Приложение. Принятые обозначения: + — хорошее сопротивление материала; — — плохое; ++ — слабое действие среды.

4.5 ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

Общие положения. В синхронных механизмах используются постоянные магниты из магнитно-твёрдых сплавов железо—никель—алюминий—cobальт, легированных медью, титаном и другими элементами; порошковых магнитно-твёрдых материалов, а также сплавов на основе редкоземельных металлов, имеющих магнитную энергию 4—72 кДж/м³ [31, 32, 34, 36, 38, 39].

Магнитные свойства магнитно-твёрдых материалов характеризуются кривой размагничивания — участком гистерезисной петли во втором квадранте в координатах индукция — напряженность B — H . При намагничивании до насыщения J_s (или до индукции насыщения B_s) после снятия намагничающего поля пересечение петли гистерезиса с осью B происходит в точке остаточной индукции B_r , а с осью H — в точке коэрцитивной силы H_c . Положение рабочей точки на кривой размагничивания определяется конфигурацией магнитной цепи.

Связь индукции и напряженности выражается зависимостью

$$B = \mu_0 \mu H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$, Г/м; μ — относительная магнитная проницаемость.

При воздействии на магнит поля напряженностью ΔH рабочая точка магнита перемещается по возвратному частному циклу, который заменяют прямой возврата. Линии возврата начинаются от точек на кривой размагничивания. Ход их характеризуется коэффициентом возврата

$$\rho = \frac{\Delta B}{\Delta H \mu_0},$$

где ΔB — изменение индукции при изменении напряженности поля на величину ΔH .

Наклон линий возврата изменяется в зависимости от положения начальной точки на кривой размагничивания. Для литых магнитов можно принять, что линии возврата параллельны касательной к кривой размагничивания в точке $B = B_r$, $H = 0$. В точках кривой $B = B_r$, $H = 0$ и $B = 0$, $H = H_c$ энергия магнита $W = 0$. На кривой существует точка с параметрами B_d и H_d , для которой энергия

$$W = (B_d H_d)/2 = W_{\max}.$$

Максимальная энергия W_{\max} тем больше, чем больше значения B_r , H_c и коэффициент выпуклости кривой размагничивания γ . Коэффициент выпуклости $\gamma = B_d H_d / (B_r H_c)$.

Геометрия магнитной системы и материал магнита должны быть такими, чтобы магнит работал в зоне, близкой к максимальной энергии.

Для ряда материалов одной из характеристик является коэрцитивная сила по намагниченности jH_c , равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения намагниченности от остаточной до нуля.

Магниты из сплавов железа—никеля—алюминия. Магниты этой группы изготавливаются литьем. Сплавы содержат 16—6,5% алюминия, 35—12% никеля, а также легирующие элементы: 4—1,5% меди, 31,5—14% кобальта, 3,5—0,2% титана, 1,5—0,5% ниobia и 1,5—0,3% кремния (ГОСТ 17809—72). Остальное железо.

Плавка сплавов производится в высокочастотных индукционных печах. Литье магнитов производится в землю, по выплавляемым моделям или в кокиль. Для получения хороших магнитных свойств отливки подвергают термомагнитной обработке (магнит, нагретый до температуры 1250—1300° С, остывает в магнитном поле необходимой конфигурации с напряженностью 160—200 кА/м и выше до 600° С). В ряде случаев используется литье в магнитном поле. Для получения магнитов с направленной вдоль оси кристаллической структурой заливку сплава производят в кварцевую трубу, дно которой является холодильником. Для увеличения H_c магниты с магнитной текстурой отпускают. После этого производится размагничивание и механическая обработка. Готовая деталь намагничивается в соответствии с анизотропией.

Магнитные параметры сплавов приведены в табл. 4.10. На рис. 4.2—4.8 приведены кривые размагничивания сплавов. Прямые из этих рисунков соединяют начало координат с точкой $(BH)_{\max}$.

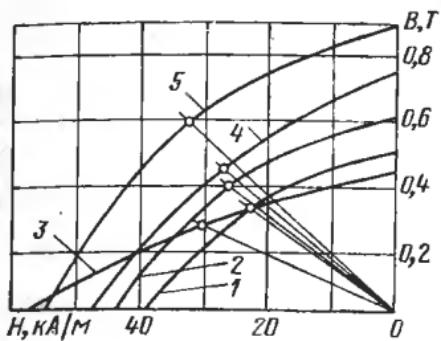


Рис. 4.2. Кривые размагничивания:

1 — ЮНД4; 2 — ЮНД8; 3 — ЮНТС; 4 — ЮНДК15; 5 — ЮНДК18

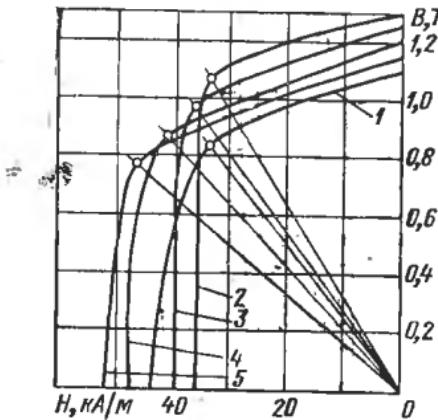


Рис. 4.3. Кривые размагничивания:

1 — ЮНДК18С; 2 — ЮН13ДК24С; 3 — ЮН13ДК24; 4 — ЮН14ДК24; 5 — ЮН15ДК24

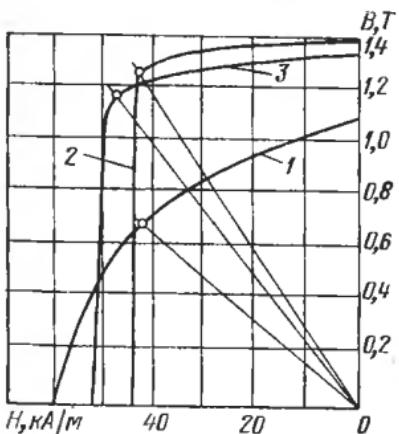


Рис. 4.4. Кривые размагничивания:

1 — ЮН14ДК24Т2;
2 — ЮН13ДК25А;
3 — ЮН14ДК25А

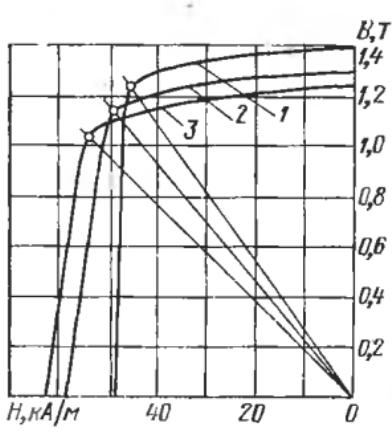


Рис. 4.5. Кривые размагничивания:

1 — ЮН13ДК25БА;
2 — ЮН14ДК25БА;
3 — ЮН15ДК25Б

Следует отметить, что наиболее высокими магнитными свойствами отличаются сплавы с направленной кристаллизацией, однако вследствие специфики их производства они изготавливаются цилиндрической формы с осевой намагниченностью. Промышленный выпуск их ограничен. Магнитно-анизо-

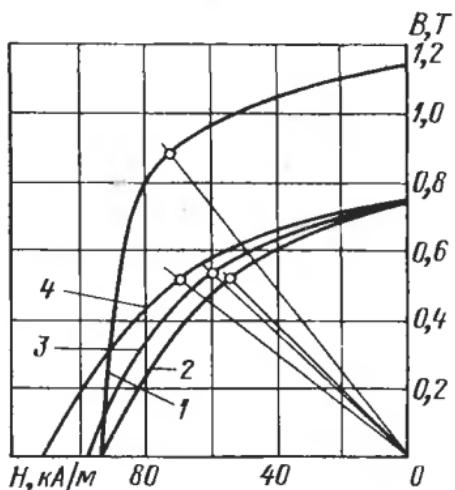


Рис. 4.6. Кривые размагничивания:

1—ЮНДК31Т3ВА; 2—ЮНДК34Т5;
3—ЮНДК35Т5Б; 4—ЮНДК35Т5

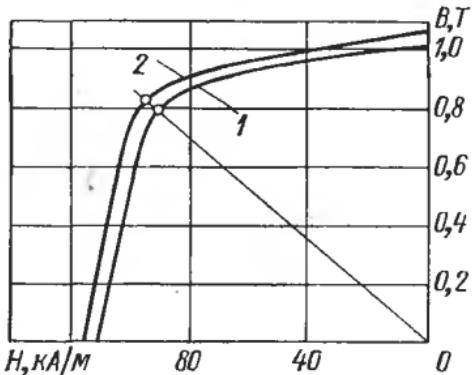


Рис. 4.7. Кривые размагничивания:

1—ЮНДК35Т5ВА;
2—ЮНДК35Т5АА

тропные сплавы имеют высокие магнитные свойства в направлении магнитной текстуры, полученной в результате термомагнитной обработки. Они выпускаются промышленностью в больших количествах.

Для литых магнитов допустимое напряжение на растяжение при трехкратном запасе составляет не более $100 \cdot 10^5$ Па. Линейная скорость на поверхности магнита должна быть не более 50 м/с.

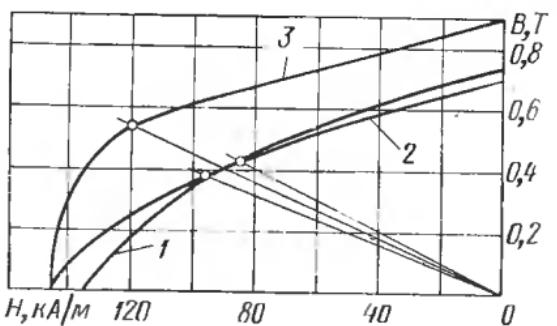


Рис. 4.8. Кривые размагничивания:

1—ЮНДК38Т7;
2—ЮНДК40Т8;
3—ЮНДК40Т8АА

Магниты из порошков. Магниты из порошков получают методом прессования. Изделия получают с точностью, в ряде случаев исключющей дополнительную механическую обработку. Магниты целесообразно применять при массовом производстве, массе до нескольких сот граммов при сложной конфигурации магнита.

Магниты из порошков подразделяются на виды: металлокерамические, изготавляемые прессованием и спеканием из порошков магнитно-

Таблица 4.10. Магнитные свойства сплавов по ГОСТ 17809—72

Марка сплавов	Максимальная магнитная энергия W_{\max} , кДж/м ³	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Остаточная индукция B_r , Т	Отношение $B/H \cdot 10^3$ в точке W_{\max} , Тм/кА	Напряженность в точке W_{\max} , H_d , кА/м	Индукция в точке W_{\max} , B_d , Т	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Тип кристаллической структуры
ЮНД-4	3,6	40	0,50	12,0—16,0	22,5	0,32	7,3	
ЮНД-8	5,1	44	0,60	13,0—16,0	25,5	0,40	7,6	
ЮНТС	4,0	58	0,43	7,0—10,0	30,0	0,265	7,8	
ЮНДК15	6,0	48	0,75	15,5—18,0	27,0	0,45	7,8	
ЮНДК18	9,7	55	0,90	15,0—20,0	33,0	0,59		Равноосная
ЮНДК18С	14,0	44	1,10	22,0—28,0	34,0	0,82		
ЮН13ДК24С	18,0	36	1,30	30,0—33,0	33,5	1,07		
ЮН13ДК24	18,0	40	1,25	25,0—27,5	37,0	0,97		
ЮН14ДК24	18,0	48	1,20	20,0—22,0	41,4	0,87		
ЮН15ДК24	18,0	52	1,15	15,0—17,5	47,0	0,77		
ЮН14ДК24Т2	15,0	60	1,10	16,0—19,0	41,4	0,72	7,7	
ЮН13ДК25А	28,0	44	1,40	27,5—30,0	44,0	1,27		
ЮН14ДК25А	28,0	52	1,35	24,0—25,0	47,7	1,17		
ЮН13ДК25БА	28,0	48	1,40	26,5—27,5	45,6	1,23		Столбчатая
ЮН14ДК25БА	28,0	58	1,30	21,5—24,0	49,6	1,13		
ЮН15ДК25БА	28,0	62	1,25	16,5—21,5	54,2	1,03		
ЮНДК31Т3БА	32,0	92	1,15	11,0—14,0	71,8	0,89	7,8	

Марка сплавов	Максимальная магнитная энергия W_{\max} , кДж/м ³	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Остаточная индукция B_r , Т	Отношение $B/H \cdot 10^3$ в точке W_{\max} , Тм/кА	Напряженность в точке W_{\max} H_d , кА/м	Индукция в точке W_{\max} B_d , Т	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Тип кристаллической структуры
ЮНДК34Т5	14,0	92	0,75	8,0—11,0	54,2	0,52	7,8	Равноосная
ЮНДК35Т5Б	16,0	96	0,75	8,0—10,0	59,6	0,54		
ЮНДК35Т5	18,0	110	0,75	7,0—8,0	69,4	0,52		
ЮНДК35Т5БА	36,0	110	1,02	8,0—9,0	92,3	0,78	8,0	Столбчатая
ЮНДК35Т5АА	40,0	115	1,05	8,0—9,0	97,0	0,83		Монокристаллическая
ЮНДК38Т7	18,0	135	0,75	4,5—5,5	84,9	0,42	8,0	Равноосная
ЮНДК40Т8	18,0	145	0,70	3,5—4,5	95,0	0,38		
ЮНДК40Т8АА	32,0	145	0,90	4,0—5,0	120,0	0,53		Монокристаллическая

П р и м е ч а н и я: 1. В марках сплавов буквы обозначают: Б — ниобий, Д — медь, К — кобальт, Н — никель, С — кремний, Т — титан, Ю — алюминий, А — столбчатая кристаллическая структура, АА — монокристаллическая структура, цифры — процентное содержание элементов. 2. Все сплавы, кроме ЮНД4, ЮНД8, ЮНТС, ЮНДК15 и ЮНДК18, — магнитно-анизотропные.

твёрдых сплавов; металлокерамические, прессуемые из порошков магнитно-твёрдых сплавов со связующими смолами (вследствие низких магнитных свойств далее не рассматриваются); оксидные, получаемые прессованием в магнитном поле порошкообразных окислов металлов и последующим их спеканием; магниты из микропорошков, изготовленные по той же технологии, что и оксидные, но из порошков, частицы которых имеют размеры 0,01—0,1 мкм (промышленностью не изготавливаются и далее не рассматриваются).

1. Металлокерамические магниты. Изготавляются из сплавов железо—никель—алюминий—кобальт, никель—кобальт, медь—никель—железо, железо—кобальт—молибден, платина—кобальт. Последние не используются из-за высокой стоимости.

Технология производства металлокерамических магнитов позволяет изготавливать магниты с магнитопроводящей арматурой (полюсными наконечниками и магнитопроводами).

Магнитные свойства металлокерамических магнитов приведены в табл. 4.11. Прочность металлокерамики в три раза выше, чем у литых магнитов. Допустимое напряжение на растяжение составляет 30,0 МПа. Линейная скорость на поверхности магнита должна быть не более 150 м/с.

2. Оксидные магниты и магниты из микропорошков. Наиболее распространены изотропные (БИ) и анизотропные (БА) бариевые ферриты ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). Магнитные свойства бариевых ферритов приведены в табл. 4.12. Кривые размагничивания бариевых ферритов приведены на рис. 4.9—4.10.

Таблица 4.11. Магнитные свойства металлокерамических магнитов по ГОСТ 13596—68

Марка магнита	Максимальная энергия W_{\max} , кДж/м	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Остаточная индукция B_r , Т	Напряженность в точке $W_{\max}H_d$, кА/м	Индукция в точке $W_{\max}B_d$, Т
ММК1	3,0	24	0,60	17	0,35
ММК2	3,5	39	0,48	23	0,30
ММК3	4,0	44	0,52	27	0,30
ММК4	4,5	40	0,55	30	0,30
ММК5	4,7	44	0,60	27	0,35
ММК6	5,0	44	0,65	25	0,40
ММК7	10,5	44	0,95	35	0,60
ММК8	14,0	40	1,10	35	0,80
ММК9	12,0	80	0,75	54	0,45
ММК10	15,0	100	0,80	57	0,53
ММК11	16,0	128	0,70	80	0,40

Примечание. Плотность $\rho = (6,9 \div 7,3) \cdot 10^3$ кг/м³.

Из данных магнитов видно, что они обладают большей ксерцитивной силой и меньшей остаточной индукцией по сравнению с литыми магнитами. Обычно магниты изготавливают в виде полос, колец и дисков небольшой толщины. Большая величина H_c обуславливает высокую

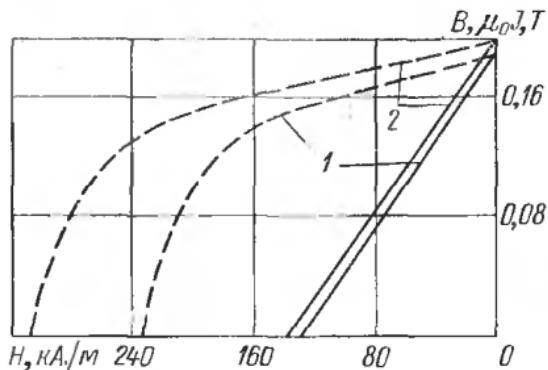


Рис. 4.9. Кривые размагничивания:
1 — 1БИ1; 2 — 1БИ2; $B = \mu_0 J = f(H)$

стабильность магнитов при воздействии внешних полей, вибраций, ударов, структурного старения. Бариевые магниты намагничают до сборки, так как кривая возврата у них практически совпадает с кривой размагничивания.

Таблица 4.12. Магнитные свойства бариевых ферритов

Марка	Остаточная индукция B_r , Т	Ксерцитивная сила H_c , кА/м	Намагнич. способность j/H_c , кА/м	Максимальная энергия W_{max} , кДж/м³	Примечания
1БИ1	0,19	128	233	3,2	Высокое электрическое сопротивление
1БИ2	0,2	136	304	3,4	—
1БИП	0,19	120	248	2,8	—
1БИС	0,21	128	216	3,6	Изотропен, используется для многополюсных систем
1БАР	0,245	128	200	4,0	Радиальная текстура
2БА1	0,3	200	304	7,4	—
2,3БА	0,33	212	224	9,2	—
2,4БА	0,33	224	264	9,6	Работоспособен при температурах до -50°C
2,8БА	0,36	217	224	11,2	—
3,1БА	0,38	168	172	12,4	—
3БА1	0,37	208	216	12,0	—
3БА2	0,35	240	304	10,4	—

Примечание. Плотность $\rho = (4,4 \div 4,9) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Недостатками бариевых ферритов являются высокие хрупкость и твердость, большая зависимость магнитных свойств от температуры. При охлаждении свойства меняются необратимо. Для стабилизации свойств по температуре магниты охлаждают до -60°C и выдерживают 4 ч.

Другой разновидностью ферритов являются кобальтовые ферриты ($\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Они стабильно работают при низких температурах.

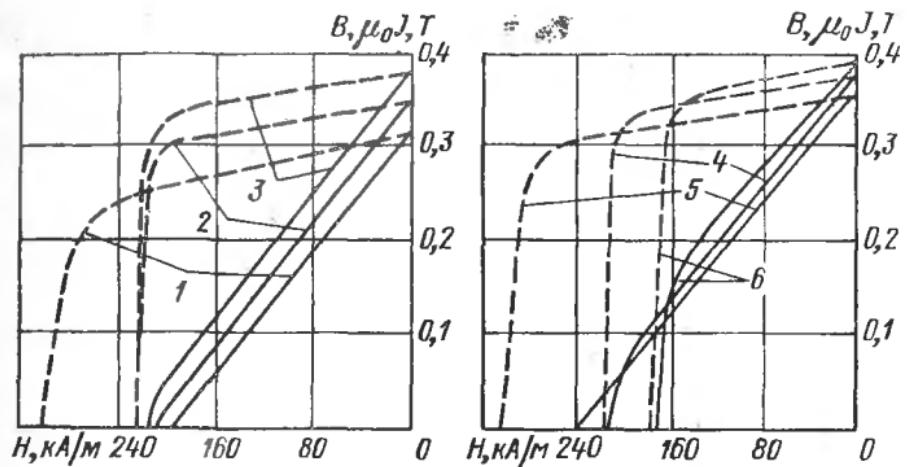


Рис. 4.10. Кривые размагничивания бариевых ферритов:

1 — 2БА1; 2 — 2,3БА; 3 — 2,8БА; 4 — 3БА1; 5 — 3БА2; 6 — 3,1БА; — — $B = f(H)$; - - - $\mu_0J = f(H)$

Необратимые изменения наблюдаются в области температур выше 80°C . Магниты выпускаются в виде колец, шайб и призм. Магнитные свойства кобальтовых ферритов:

	1,5 kA	2 kA
B_r , Т	0,24	0,28
H_c , кА/м	128	128
iH_c , кА/м	136	136
W_{\max} , кДж/м ³	5,6	7,2

Кривые размагничивания приведены на рис. 4.11.

Сплавы на основе редкоземельных металлов (РЗМ). Сплавы с РЗМ обладают весьма высокими значениями H_c и W_{\max} , однако процесс их производства в настоящее время сложен и стоимость велика. Получают магниты с РЗМ холодным прессованием, спеканием из порошка или литьем. По ГОСТ 21559—76 выпускается четыре типа магнитных сплавов с РЗМ.

Магнитные свойства магнитов с РЗМ по ГОСТ 21559—76:

	КС37	КС37А	КСП37	КСП37А
B_r , Т	0,77	0,82	0,85	0,90
H_c , кА/м	540	560	520	500
iH_c , кА/м	1300	1000	800	640
W_{\max} , кДж/м ³	55	65	65	72

Стабильность постоянных магнитов. При воздействии внешних условий и с течением времени параметры магнитов изменяются. На параметры магнитов влияют: внешние магнитные поля, механические нагрузки, удары, вибрации, температура, радиация, изменение магнитного сопротивления магнитной цепи [24, 32].

Причинами изменения свойств являются структурная и магнитная нестабильность. Структурная нестабильность — изменение кристаллической структуры, фазовые превращения и т. п. — приводят к структурному старению (утрате начальных магнитных свойств). Восстановление свойств достигается повторной термической обработкой. Структурная стабильность сплавов Fe—Ni—Al—Co повышается путем отпуска при повышенной температуре с последующим медленным охлаждением. Магнитная нестабильность вызвана изменением магнитной (доменной) структуры во времени и изменением внешних условий. Она может быть обратимой (устраняется возвращением внешних условий к начальным) и необратимой (устраняется повторным намагничиванием). Величина старения зависит от рабочей точки магнита, температуры и других факторов.

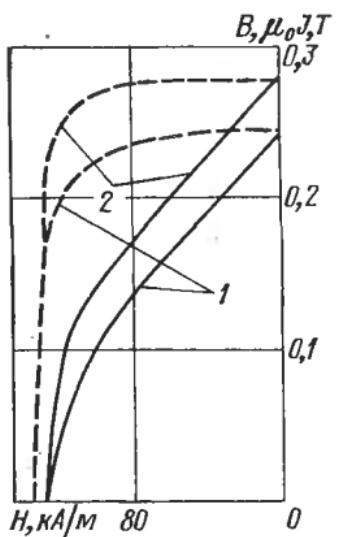


Рис. 4.11. Кривые размагничивания кобальтовых ферритов:

1 — 1,5 кА; 2 — 2 кА;
 $B = f(H)$;
 $\mu_0 J = f(H)$

стенного магнитного старения сплавов типа ЮНДК за 1 год и рекомендуемое размагничивание для стабилизации свойств. Литые сплавы после $(2 \div 5) \cdot 10^5$ ударов теряют 2,5—3% магнитного потока, после чего стабилизируются. Сильная вибрация в широком диапазоне частот снижает поток не более чем на 1%.

Нагрев, как и охлаждение, приводят к изменению намагченности. Для сплавов ЮНДК24 и ЮНДК35Т5 при охлаждении необратимые изменения составляют: при -70°C — 2%, при -180°C — до 16%; обратимые изменения при -180°C составляют до 8%. При нагреве необратимые изменения составляют: при 300°C — 1%, при 500°C — 2,2%, при 600°C — до 6%; обратимые изменения при 600°C доходят до 15%.

При нагреве выше 500°C у литых магнитов начинается размагничивание вплоть до точки Кюри (температуры полной потери магнитных свойств). Для получения постоянства характеристики магнита производится их стабилизация, предусматривающая все виды старения. При этом уменьшаются необратимые изменения магнитной индукции.

Таблица 4.13. Естественное магнитное старение сплавов типа ЮНДК за 1 год и рекомендуемое размагничивание для стабилизации свойств

Характер размагничивания	ЮНДК24			ЮНДК25БА			ЮНДК35ТБ		
	в	с	н	в	с	н	в	с	н
Временное старение, %	0,5	1,0	1,7	0,2	0,6	1,5	0,2	0,4	0,6
Стабилизирующее размагничивание, %	4	8	12	2	4	12	2	3	4
Характер размагничивания	ЮНДК35ТБА			ЮНДК38Т7			ЮНД4		
	в	с	н	в	с	н	в	с	н
Временное старение, %	0,2	0,5	0,8	0,1	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0
Стабилизирующее размагничивание, %	2	4	5	1	2	4	8	15	20

Приимечания: 1. Приятые обозначения: в — высокая рабочая точка, с — средняя, н — низкая. 2. Указанная величина стабилизирующего размагничивания обеспечивает с точностью до 0,1% отсутствие временного старения при неизменных внешних условиях.

Основными методами являются частичное размагничивание магнита и обработка нагревом. Магнитная стабилизация производится с помощью искусственного уменьшения магнитной индукции на 3—10% тем или иным методом. Магнит при этом переводится на работу по частному циклу или по прямой возврата. Проще всего реализуется размагничивание переменным электромагнитным полем. При этом систему помещают в катушку, питаемую током 50 Гц, и затем медленно из нее удаляют. Рекомендуемые величины стабилизирующего размагничивания для сплавов типов ЮНДК приведены в табл. 4.13.

Стабилизация переменным током магнитов из феррита бария с предельной кривой размагничивания не производится. Температурная стабилизация производится воздействием температуры в рабочем диапазоне ее значений. При этом литье магниты три—пять раз нагревают и охлаждают до температуры выше и ниже наибольшей рабочей. Дальнейшие обратимые изменения магнитных свойств стабилизированного магнита при колебаниях температуры могут быть определены температурным коэффициентом индукции

$$\alpha_B = \Delta B / (B \Delta t),$$

где B — индукция при начальной температуре; Δt — изменение температуры; ΔB — изменение индукции, вызванное изменением температуры на Δt .

В табл. 4.14 приведены значения α_B для магнитов типа ЮНДК в области $(BH)_{\max}$.

Т а б л и ц а 4.14. Значения коэффициента α_B
в области $(BH)_{\max}$

Магнитный сплав	Коэффициент α_B , %/ $^{\circ}\text{C}$, в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$						
	(-180) — (-80)	(-80) — (+20)	20—200	200—300	300—400	400—500	500—600
ЮНДК24	+0,015	-0,020	-0,015	-0,023	-0,030	-0,037	-0,044
ЮНДК25БА	+0,015	-0,020	-0,015	-0,023	-0,030	-0,037	-0,044
ЮНДК35Т5	+0,025	+0,025	-0,008	-0,015	-0,019	-0,024	-0,028
ЮНДК35Т5БА	+0,025	+0,025	-0,008	-0,015	-0,019	-0,024	-0,028
ЮНДК38Т7	+0,020	+0,020	-0,006	-0,011	-0,017	-0,022	-0,026
ЮНД4	+0,020	+0,020	-0,020	-0,026	-0,033	—	—

Магнит из феррита бария стабилизируют охлаждением до температуры не выше -60°C в течение 4 ч. Кобальтовые ферриты стабилизируют нагревом до температуры выше 80°C . Для магнитов из ферритов бария $\alpha_B = -0,19\%/\text{°C}$ и не зависит от положения рабочей точки. Для металлокерамических магнитов марок ММК1—ММК11 $\alpha_B = -0,035 \pm 0,048\%/\text{°C}$.

Иногда магниты работают при высоких температурах. В этом случае необходимы специальные приемы стабилизации магнитных свойств. Они состоят в длительной выдержке магнитов при 550 — 650°C и последующей магнитной стабилизации. После такой температурной стабилизации магниты из сплавов ЮНДК35Т5, ЮНДК35Т5БА, ЮНДК38Т7 при 500°C стабильны без ограничения времени, при 550°C стабильны не менее 10 000 ч, при 600°C — 1000 ч, при 650°C — 50 ч. Сплавы ЮНДК24 и ЮНДК25БА при 500°C стабильны не менее 10 000 ч, при 550°C — 1000 ч, при 600°C — 50 ч. В указанных пределах старение не превышает 1%. При температурах выше 600°C магнитный поток резко падает.

Для сплавов ЮНДК24 и ЮНДК35Т5 точка Кюри соответствует 850°C , для ферритов бария — 450°C , ферритов кобальта — 550°C , для металлокерамики — 800°C .

Намагничивание и размагничивание магнитов и магнитных систем. Напряженность намагничающего поля должна быть достаточной для насыщения намагничиваемого магнита, кроме того, форма силовых линий намагничающего поля должна соответствовать направлению вектора намагченности, которое необходимо иметь в магните. Если магнит имеет анизотропию, то поле должно быть сориентировано в направлении текстуры.

Напряженность намагничивающего поля для магнита, помещенного в замкнутый магнитопровод, должна по ГОСТ 13601—68 иметь такую величину: при которой уменьшение напряженности на 25% не приводит к уменьшению B_r и H_c более чем на 1%. Необходимые значения напряженности намагничивающего поля приведены в табл. 4.15.

Т а б л и ц а 4.15. Значения напряженности намагничивающего поля

Марка сплава	Максимальная напряженность H_{\max} , кА/м	Соотношение H_{\max}/H_c	Марка сплава	Максимальная напряженность H_{\max} , кА/м	Соотношение H_{\max}/H_c
ЮНД8	160	3,6	ЮНДК35Т5	400	3,6
ЮНДК15	240	5,0	ЮНДК24Т2	300	5,0
ЮНДК18	240	4,4	ЮНДК24	240	4,6

Желательно намагничивание магнитов (кроме феррита бария) после сборки магнитной системы, так как при этом индукция в рабочем зазоре оказывается выше, чем при намагничивании до сборки, и магнит лучше использован. Кроме того, сборка намагниченного магнита с конструктивными элементами СММ не технологична из-за значительных механических сил между элементами устройства, необходимости использования немагнитного инструмента, возможности попадания в СММ магнитных частиц, пыли и т. п.

Намагничивание магнитов производится при помощи электромагнитов, установок импульсного намагничивания, катушек постоянного тока и устройств с постоянными магнитами. Выбор того или иного способа намагничивания и применяемые для этого приспособления определяются формой магнита и конструкцией магнитной системы. Наиболее распространенным методом является намагничивание при помощи установки, генерирующей мощный импульс тока. В таких установках энергия накапливается в конденсаторах в течение сравнительно длительного времени, а затем за малый промежуток времени импульсно разряжается на намагничающую катушку, создающую мощное намагничающее поле.

При намагничивании электромагнитами магнит или СММ размещаются между полюсами магнитопровода намагничающего устройства. Преимуществом такого намагничивания постоянным током является отсутствие вихревых токов. Намагничающие устройства с постоянными магнитами применяются для намагничивания мелких магнитов и должны иметь изменяющуюся напряженность поля с зазором, что достигается перемещающимися магнитами, шунтами или другими способами.

Размагничивание может быть произведено импульсно при обратной с полем магнита полярности поля намагничающей катушки. Размагничивание производится на пониженном напряжении.

Наиболее часто используется размагничивание воздействием переменного поля частотой 50 Гц. При этом систему вводят в катушку, включенную в сеть переменного тока, а затем медленно удаляют из нее, либо постепенно уменьшают ток до нуля. Напряженность поля размагничающей катушки должна быть больше величины H_c . Так как арматура СММ может экранировать размагничающее поле за счет вихревых токов, в ряде случаев следует использовать напряжение частотой ниже 50 Гц.

Отдельные магниты могут быть размагнечены нагревом до температуры выше точки Кюри.

Соединение магнитов с конструктивными деталями СММ. В связи с невозможностью изготовления резьбовых отверстий в магнитах установка магнита в СММ осуществляется специальными приемами.

В СММ используются следующие способы соединения магнитов с деталями, образующими магнитную систему:

1) механическое соединение с помощью установки магнита в немагнитные корпуса по посадке;

2) заливка магнита в легкоплавкий металл (силиumin и др.) и крепление к остальным деталям с помощью крепежных деталей через отверстия в металле заливки;

3) отливка магнита с пробками или на вал из немагнитной конструкционной стали;

4) склейка магнита с деталями СММ.

Выбор способа соединения зависит от конфигурации магнита и арматуры, а также от конкретных условий работы разрабатываемого механизма.

При отливке магнита на вал он устанавливается в литейную форму, после чего производится заливка магнита. Диаметр вала во избежание трещин и сколов не должен превышать 20—30% диаметра магнита. При использовании kleевого соединения необходимо учитывать конструкцию магнитной системы в целом, а также механические нагрузки, действующие на детали СММ в процессе работы. Для склеивания литьих и металлокерамических магнитов можно применять следующие клеи:

1. Эпоксидный пластифицированный клей (эпоксидная смола ЭД-5 — 100 массовых частей, эпоксидная смола ДЭГ-1 — 20 массовых частей, полиэтилен — 20 массовых частей, полиамин — 20 массовых частей). Режим полимеризации: выдержка в течение 25 мин при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ или в течение 2 мин при температуре 100°C . Клей применяется для механизмов, работающих без воздействия влаги и больших механических нагрузок.

2. Клей марки К-400 на эпоксидно-, полиамидно-, кремнийорганической основе (смола Т-Ш—100 массовых частей, полиамидная смола Л-20—40 массовых частей, нитрид бора — 60 массовых частей). Режим полимеризации: выдержка в течение 4 мин при температуре 80°C . Клей применяется при работе узлов в жестких механических и климатических условиях (длительное воздействие влажного воздуха, морского тумана, грибков).

3. Клей марки БФ-4 (спиртовой раствор фенолформальдегидной смолы и поливинилбутираля). Режим полимеризации: выдержка в течение 6 мин при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ или 1—2 мин при температуре $60—70^\circ\text{C}$. Клей применяется для узлов, работающих при незначитель-

ных механических нагрузках в сухих помещениях. При режиме горячей полимеризации необходимо учитывать разность коэффициентов линейного расширения магнита и клея, что определяет необходимость медленного охлаждения изделия.

Магниты из металлокерамики могут соединяться с конструктивными деталями спеканием, при этом прочность зоны соединения составляет ~400 МПа.

4.6

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Гистерезисные материалы используются для изготовления активной части (гистерезисного слоя) в магнитно-гистерезисных муфтах. Материалы работают в переменном магнитном поле с напряженностью не ниже 2000 А/м. Они характеризуются оптимальными индукцией B_{Γ} и напряженностью H_{Γ} поля, удельными потерями на гистерезис p_{Γ} , отношением p_{Γ}/H_{Γ} , синусом гистерезисного угла $\sin \gamma_{\Gamma}$, а также коэффициентом выпуклости петли гистерезиса γ_B ,

$$\sin \gamma_{\Gamma} = \frac{p_{\Gamma} 10^6}{\pi H_{\Gamma} B_{\Gamma}},$$

где p_{Γ} — в Вт/(см³· Гц); H_{Γ} — в А/м; B_{Γ} — в Т;

$$\gamma_B = \frac{S}{4H_{\Gamma} B_{\Gamma}},$$

где S — площадь петли гистерезиса.

Необходимый объем гистерезисного слоя определяется величиной p_{Γ} . Чем больше ее значение, тем меньше необходимый объем слоя при заданной мощности устройства. Величина $\sin \gamma_{\Gamma}$ определяет качество материала. При равных значениях B_{Γ} и H_{Γ} максимальный гистерезисный момент тем выше, чем больше значение $\sin \gamma_{\Gamma}$. Величина γ_B примерно пропорциональна значению $\sin \gamma_{\Gamma}$. Отношение p_{Γ}/H_{Γ} позволяет оценить гистерезисный материал с точки зрения определения габаритов индуктора. Чем выше это отношение, тем меньше необходимые размеры индуктора. При работе гистерезисного материала в точке петли гистерезиса с параметрами B_{Γ} и H_{Γ} магнитная проницаемость максимальна. Магнитные свойства гистерезисных материалов в значительной степени зависят от режима термообработки и получаются после отпуска.

Свойства гистерезисных сплавов приведены в табл. 4.16 [33]. Значения параметров гистерезисных сплавов являются средними арифметическими их значений, измеренных вдоль и поперек прокатки.

Нагрев сплавов типа 52КФ в процессе работы до 150° С и охлаждение до —140° С не меняет свойств гистерезисных материалов. Нагрев до 250° С снижает свойства на 10%. Сплавы типа 12КМ, 12КМВ и 12КВ сохраняют свои свойства в диапазоне температур от —140° С до +250° С (изменения не превышают 5%).

Таблица 4.16. Свойства

Свойство	52КФА	52КФБ	52КФВ; (52КФ11)
Сплав			
Состав,* %	51,0—53,0 Co; 12,6—13,5 V; 1,0 Mn	51,0—53,0 Co; 11,6—12,5 V; 1,0 Mn	51,0—53,0 Co; 10,0—11,5 V; 1,0 Mn
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³			
Структура			
Сортамент	Холоднокатанный лист толщиной 0,2—1,3 мм, 1,2×1,2; 1,5×1,5;		
Термообработка			
Механическая обработка	До термообработки — штам		
Оптимальная индукция B_Γ , Т	0,75—0,85	0,85—0,95	1,0—1,05
Оптимальная напряженность H_Γ , кА/м	27,9—38,5	19,9—27,9	11,9—19,9
Удельные потери на гистерезис p_Γ , Вт/(см ³ ·Гц)	0,0437—0,0567	0,035—0,0525	0,027—0,050
Отношение $p_\Gamma/H_\Gamma \times 10^3$, Вт·м/(см ³ × Гц·кА)	1,54—1,69	1,76—1,88	2,26—2,51
Коэффициент выпуклости γ_B	0,58—0,62	0,58—0,62	0,58—0,62
Значение $\sin \gamma_\Gamma$	0,65—0,75	0,65—0,75	0,7—0,8
Предел прочности σ_B , МПа			

гистерезисных сплавов

Марка сплава

52КФ9	52КФ7	52КФ5
Fe—Co—V		
52,0—54,0 Co; 7,8—9,0 V	52,0—54,0 Co; 5,8—7,0 V	52,0—54,0 Co; 3,8—5,0 V
		8,1

Анизотропная

ширина до 140 мм, проволока \varnothing 0,5—3 мм или квадратная
2,5×2,5; 3,0×3,0 мм

при 600—620° С

повка, резание; после термообработки — шлифование

1,1—1,15	1,2—1,3	1,3—1,4
7,9—11,9	5,6—7,9	4,0—5,2
0,019—0,0315	0,0147—0,022	0,0125—0,0175
2,40—2,65	2,63—2,78	3,13—3,36
0,58—0,62	0,58—0,62	0,58—0,62
0,7—0,8	0,70—0,80	0,75—0,80

1200—2000

Свойство	52КФА	52КФБ	52КФВ; (52КФII)		
Удельное электросопротивление $\rho_{\text{э}} \times 10^6$, Ом·м					
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $(^{\circ}\text{C})^{-1}$, в интервале температур 20 — 100°C					
Свойство	12ГН	12НГ	12КМ14	12КМ16	12КМВ12
Сплав	Fe—Ni—Mn	Fe—Co—Mo			
Состав *, %	11,5— 12,5 Mn; 3,0— 4,0 Ni	11,5— 12,5 Ni; 3,0— 4,0 Mo	11,5— 12,5 Co; 13,5— 14,5 Mo	11,5— 12,5 Co; 15,5— 16,5 Mo	11,5— 12,5 Co; 5,5— 6,5 Mo; 11,5— 12,5 W
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	8,1		8,6		8,7
Структура	Анизотропная				
Сортамент	Холоднокатанный лист толщиной 0,5—1,0 мм		Поковка \varnothing до 60 мм; го 2—6 мм; горячеката		
Термообработка	Отпуск при 480— 500° С	Отпуск при 420— 540° С	Закалка в масло при 1250—1300° С, отпуск при 700—750° С		

Марка сплава

52КФ9

52КФ7

52КФ5

0,6—0,67

11—13

Марка сплава

12КМВ14

12КВ

16КВМ

ЕХ3

ШХ15

Fe—Co—W—Mo

11,5—
12,5 Co;
5,5—
6,5 Mo;
13,5—
14,5 W12 Co;
14 Mo16 Co;
10,5 W;
3,5 Mo

8,85

8,5

8,65

7,8

7,8

Изотропная

речекатаный лист толщиной
ные трубы $\varnothing 45 \times 5,0$ Прокат \varnothing до
70 мм; 70×70 мм

Поковка, лист

Закалка
при 1150—
1250° С, от-
пуск при
650—750° СОтпуск
при
650—
750° СНормализация
при 1000—1050° С,
10 мин, закалка
в масле при 800—
840° С, 10 мин,
старение 24 ч, от-
пуск при 120° С
4—5 чОтжиг при
790—810° С, за-
калка в масле при
820—860° С, от-
пуск на воздухе
при 150—160° С

Свойство					
	12ГН	12НГ	12КМ14	12КМ16	12КМВ12
Механическая обработка	До термообработки — штам				
Оптимальная индукция B_g , Т	1,0—0,5	1,0—1,2	0,95—1,05	0,95—1,05	1,01—1,1
Оптимальная напряженность H_g , кА/м	4,0—19,9	2,0—3,2	15,9—19,9	21,5—27,0	11,9—15,9
Удельные потери на гистерезис p_g , Вт/(см ³ · Гц)	0,007—0,04	0,004—0,008	0,0360—0,0550	0,0486—0,0680	0,0285—0,044
Отношение $p_g/H_g \times 10^3$, Вт·м/(см ³ × Гц·кА)	1,75—2,01	2,0—2,5	2,26—2,76	2,26—2,51	2,39—2,77
Коэффициент выпуклости γ_b	0,45—0,55	0,50—0,55	0,52—0,58	0,52—0,58	0,52—0,6
Значение $\sin \gamma_g$	0,5—0,6	0,6—0,7	0,66—0,74	0,66—0,74	0,66—0,74
Предел прочности σ_b , МПа	—				1200
Удельное электросопротивление $\rho_e \times 10^6$, Ом·м	—				
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, ($^{\circ}$ С) ⁻¹ , в интервале температур 20—100° С	—				

* В состав сплавов кроме указанных элементов входит железо.

Марка сплава

12КМВ14	12КВ	16КВМ	ЕХ3	ШХ15
повка, резание; после термообработки — шлифование				
1,0—1,1	1,0—1,1	1,0—1,1	0,6—0,9	0,8—1,0
15,9— 19,9	2,4—4,0	7,2—9,5	5,6—8,0	6,0—8,0
0,0360— 0,0525	0,0057— 0,011	0,018— 0,0264	0,005—0,010	0,006—0,010
2,26— 2,64	2,37—2,75	2,5— 2,77	0,89—1,25	1,0—1,2
0,52— 0,58	0,53—0,60	0,53— 0,60	0,36	0,35
0,66— 0,74	0,67—0,77	0,67— 0,77	0,47—0,44	0,4—0,41
	600—1000	1000	2100	750
0,4—0,45			0,29	—
10,05			12,6	11,9

4.7 ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

Подшипники, используемые в СММ, выпускаются в зависимости от соотношений наружного, внутреннего диаметров и ширины шестью сериями. Однако использование сверхлегких и особолегких подшипников допустимо лишь в технически обоснованных случаях. Подшипники по точности выпускают классов 0; 6; 5; 4 и 2 (в порядке повышения точ-

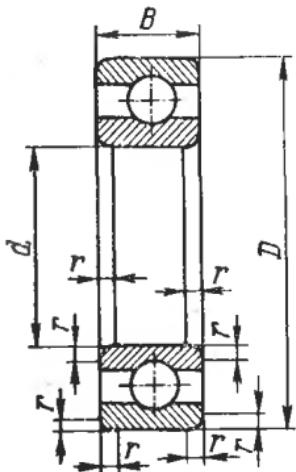


Рис. 4.12. Размеры радиального шарикоподшипника

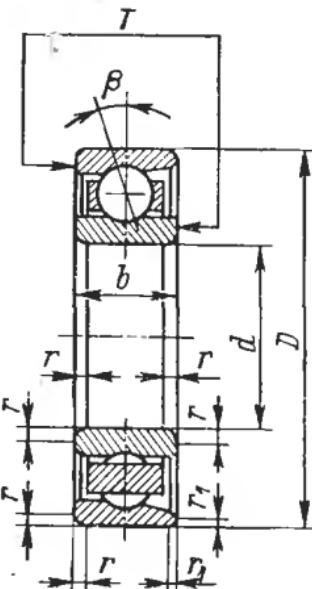


Рис. 4.13. Размеры радиально-упорного подшипника

ности). В большинстве случаев должны использоваться подшипники нормальной точности — класса 0. Если требуемая точность установки вала этим классом не обеспечивается, следует применять подшипники более высокого класса. Класс точности обозначается цифрами 0; 6; 5; 4 и 2, проставляемыми слева от условного обозначения подшипника (например, 6—202).

Величина радиального зазора и осевой игры подшипников обозначается номером соответствующего дополнительного ряда (1; 2; 3 и т. д. — в порядке возрастания зазоров) и проставляется левее класса точности. Подшипникам с радиальным зазором по основному ряду или с осевой игрой по нормальному ряду дополнительные обозначения

не даются. Малые зазоры обозначаются буквами НТ. Справа от условного обозначения подшипника указываются конструктивные особенности; обозначенные буквами: Б — сепаратор из безоловянной бронзы; Г — сепаратор из черных металлов; Д — сепаратор из алюминия.

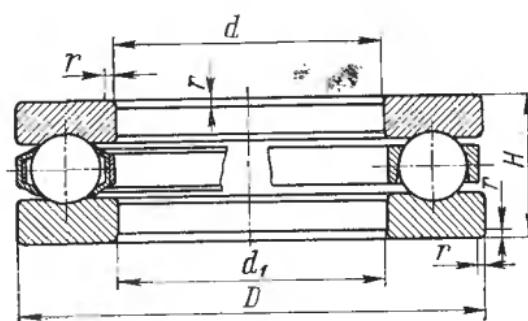


Рис. 4.14. Размеры упорного шарикоподшипника

ниевых сплавов; Л — сепаратор из латуни; Р — детали из теплоустойчивых сталей; Е — сепаратор из пластических материалов; Т, Т1, Т2 и т. д. — специальные требования к температуре отпуска деталей, Т — 200° С, Т1 — 225° С, Т2 — 250° С, Т3 — 300° С, Т4 — 350° С, Т5 — 400° С, Т6 — 450° С; У — специальные требования по чистоте

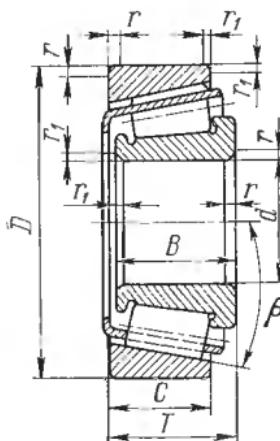


Рис. 4.15. Размеры конического роликоподшипника

обработки, зазорам, игре и т. д.; Х — детали из цементируемой стали; Ш — специальные требования по шуму; Ю — подшипник из нержавеющей стали.

В табл. 4.17—4.20 приведены размеры подшипников, используемых в синхронных механизмах.

Таблица 4.17. Шариковые радиальные однорядные подшипники по ГОСТ 8338—75 (рис. 4.12)

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм				Динамическая грузоподъемность C_e , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке		Масса G , кг
	d	D	B	r			консистентной	жидкой	
Сверхлегкая серия диаметров 8, ширина 1									
1000084 *	4	9	2,5	0,3	420	190	31 500	40 000	0,0007
1000088 *	8	16	4	0,4	980	500	25 000	31 500	0,0034
1000801 *	12	21	5	0,5	1 070	600			0,007
1000802 *	15	24	5	0,5	1 470	850	20 000	25 000	0,008
1000805 *	25	37	7	0,5	2 890	2 020	16 000	20 000	0,020
1000807	35	47	7	0,5	3 250	2 650	12 500	16 000	0,03
1000812 *	60	78	10	0,5	7 910	7 500			0,12
1000813	65	85	10	1,0	9 100	8 490	6 300	8 000	0,13
1000814	70	90	10	1,0	9 460	9 260			0,18
1000816 *	80	100	10	1,0	8 090	9 070			0,22
1000818	90	115	13	1,5	14 900	15 300	5 000	6 300	0,30
1000822	110	140	16	1,5	22 000	23 800	4 000	5 000	0,54
1000824 *	120	150	16	1,5	23 700	26 000	3 150	4 000	0,7

Сверхлегкая серия диаметров 9, ширии 1

1000093 *	3	8	3	0,3	440	200	31 500	40 000	0,0007
1000094 *	4	11			750	350			0,002
1000095	5	13			850	400			0,0025
1000096	6	15			1 160	570			0,004
1000097	7	17		0,4	1 580	790	25 000	31 500	0,005
1000098	8	19			1 750	900			0,008
1000099	9	20			2 100	1 070			0,008
1000900	10	22			2 620	1 380			0,009
1000901	12	24		0,5	2 660	1 380	20 000	25 000	0,010
1000902 *	15	28			2 530	1 510			0,017
1000903	17	30			2 850	1 680			0,018
1000904	20	37			5 140	3 120			0,035
1000905	25	42		0,9	5 740	3 750	12 500	16 000	0,042
1000906	30	47			5 950	4 060			0,049
1000907	35	55	10	1,0	8 160	5 760	10 000	12 500	0,086
1000908	40	62	12		9 540	7 060			0,11

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм				Динамическая грузоподъемность C , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения $n_{\text{макс}}$, об/мин., при смазке		Масса G , кг
	d	D	B	r			консистентной	жидкой	
1000909	45	68	12	1,0	12 300	8 290	8 000	10 000	0,15
1000911	55	80	13	1,5	12 300	10 200	6 300	8 000	0,19
1000912	60	85			12 500	10 800			
1000913 *	65	90			13 700	12 100			0,28
1000915	75	105			19 100	17 200			
1000916	80	110			21 600	19 300	5 000	6 300	0,38
1000917 *	85	120	18		25 000	22 600	4 000	5 000	0,76
1000918	90	125			25 800	24 000			
1000920	100	140	20		35 300	32 300			1,02
1000922	110	150			31 900	31 500			
1000924	120	160	22		41 600	41 000	3 150	4 000	1,1
									1,4

Особолегкая серия диаметров 1, ширин 7

7000101	12	28	7		4 000	2 270	20 000	25 000	0,018
---------	----	----	---	--	-------	-------	--------	--------	-------

7000102	15	32		0,5	4 060	2 270	-		0,025
7000103	17	35			4 680	2 660	16 000	20 000	0,036
7000105	25	47			6 570	4 240	12 500	16 000	0,06
7000106	30	55		9	7 560	5 400	10 000	12 500	0,10
7000107	35	62			7 740	5 790			0,11
7000108	40	68			10 300	8 060		8 000	10 000
7000109	45	75		10	10 500	8 570			0,17
7000110	50	80			10 800	9 070			0,18
7000111	55	90			12 900	10 800	6 300	8 000	0,28
7000112	60	95		11	13 200	11 500			0,29
7000113	65	100			13 500	12 100		5 000	6 300
7000114	70	110	13		15 800	14 200			0,45

О с о б о л е г к а я с е р и я д и а м е т р о в 1, ширина 0

17	7	19	6	0,5	2 240	1 180			0,007
18	8	22	7		2 600	1 380	25 000	31 500	0,012
100	10	26	8		3 600	2 000			0,019

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм				Динамическая грузоподъемность C , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин., при смазке		Масса G , кг	
	d	D	B	r			консистентной	жидкой		
101	12	28	8	0,5	4 000	2 270	20 000	25 000	0,022	
104	20	42	12	1,0	7 360	4 540	12 500	16 000	0,07	
105	25	47			7 900	5 040	10 000	12 500	0,08	
106	30	55	13	1,5	10 400	7 020			0,12	
107	35	62	14		12 500	8 660	8 000	10 000	0,16	
108	40	68			13 200	9 450			0,19	
109	45	75	16		16 300	12 400			0,24	
110	50	80			16 500	12 400	6 300	8 000	0,25	
111	55	90	18	2,0	22 000	17 300			0,39	
112	60	95			24 000	18 300	5 000	6 300	0,39	
113	65	100			24 100	20 000			0,45	

114	70	110			30 100	24 600			0,60
115	75	115	20		30 300	24 600			0,66
116	80	125			37 100	31 900			0,85
117	85	130	22		37 400	31 900			0,91
118	90	140			41 100	35 700			1,2
120	100	150	24	2,5	42 300	38 300			1,29
122	110	170			64 300	58 300			2,0
124	120	180	28	3,0	66 600	62 500			2,05

Л е г к а я с е р и я д и а м е т р о в 2, ширина 0

23	3	10	4	0,3	500	220			0,0016
24	4	13			920	430			
25	5	16	5	0,4	1 500	760	31 500	40 000	0,003 0,005
26	6	19	6		2 210	1 180			0,008
27	7	22	7		2 560	1 380			0,013
28*	8	24		0,5	2 620	1 380			0,019
29	9	26	8		3 570	2 000	25 000	31 500	0,019

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм				Динамическая грузоподъемность C , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке		Масса G , кг
	d	D	B	r			консистентной	жидкой	
200	10	30	9	1	4 690	2 660	20 000	25 000	0,03 0,037
201	12	32	10		4 780	2 700			
202	15	35	11	1,5	5 970	3 540	16 000	20 000	0,045 0,06
203	17	40	12		7 520	4 470			
204	20	47	14	1,5	10 000	6 300	12 500	16 000	0,10
205	25	52	15		11 000	7 090	10 000	12 500	0,12 0,19
206	30	62	16		15 300	10 200			
207	35	72	17	2,0	20 100	13 900	8 000	10 000	0,29
208	40	80	18		25 600	18 100	6 300	8 000	0,36 0,41 0,47
209	45	85	19		25 700	18 100			
210	50	90	20		27 500	20 200			
211	55	100	21	2,5	34 000	25 600	5 000	6 300	0,58 0,80 0,98
212	60	110	22		41 100	31 500			
213	65	120	23		44 900	34 700			

214	70	125	24		48 800	38 100			1,08
215	75	130	25		51 900	41 900			1,18
216	80	140	26	3,0	57 000	45 400	4 000	5 000	1,40
217	85	150	28		65 400	54 100			1,80
218	90	160	30		75 300	61 700			2,20
220	100	180	34	3,5	95 800	80 600	3 150	4 000	3,20
222	110	200	38		113 000	102 000			4,5
224	120	215	40	3,6	122 000	114 000	2 500	3 150	5,2

Средняя серия диаметров 3, ширина 0

34	4	16	5	0,5	1 480	760	31 500	40 000	0,005
35	5	19	6		2 170	1 180	25 000	31 500	0,008
300	10	35	11	1,0	6 350	3 830	20 000	25 000	0,05

Продолжение табл. 4.17

310	50	110	27		48 500	36 300		5 000	6 300	1,08
311	55	120	29	3,0	56 000	42 600				1,35
312	60	130	31		64 100	49 400				1,70
313	65	140	33		72 700	56 700		4 000	5 000	2,11
314	70	150	35	3,5	81 700	64 500				2,6
315	75	160	37		89 000	72 800				3,1
316	80	170	39		96 500	81 700		3 150	4 000	3,6
317	85	180	41		104 000	91 000				4,3
318	90	190	43		112 000	101 000				5,1
320	100	215	47	4,0	136 000	133 000		2 500	3 150	7,0
322	110	240	50		161 000	170 000				9,8
324	120	260	55		170 000	184 000		2 000	2 500	12,3

* Подшипники изготавливаются по высоким классам точности и могут быть использованы для особых условий эксплуатации (вакуум, температура более 100° С и т. д.).

Таблица 4.18. Радиально-упорные однорядные

Условное обозначение подшипника		Размеры подшипника, мм						Динамическая грузоподъемность C , Н	
Серии 36000 и 66000	Серия 46000	d	D	b	T	r	r_1	Серии 36000 и 66000	Серия 46000
Особолег									
36100		10	26	8	8			4 170	
36101		12	28	8	8	0,5		4 270	
36103	—	17	35	10	10		0,3	5 710	
36104		20	42	12	12	1,0		8 300	
—	46106	30	55	13	13	1,5	0,5		11 200
	46108	40	68	15	15				14 600
	46109	45	75	16	16				17 300
	46111	55	90	18	18				25 200
	46112	60	95	18	18				28 800
	46114	70	110	20	20	2,0	1,0		35 300
	46115	75	115	20	20				35 600
	46116	80	125	22	22				43 200
	46117	85	130	22	22				44 300
	46118	90	140	24	24	2,5	1,2		47 400
—	46120	100	150	24	24				50 200
	46122	110	170	28	28	3,0	1,5		74 400
	46124	120	180	28	28				78 300
Легкая									
36201	—	12	32	10	10			5 580	—
36202	46202	15	35	11	11	1,0	0,3	6 380	6 070
36203	46203	17	40	12	12			9 430	9 000
36204	46204	20	47	14	14			12 300	11 600
36205	46205	25	52	15	15	1,5	0,5	13 100	12 400
36206	46206	30	62	16	16			18 200	17 200
36207	46207	35	72	17	17			24 000	22 700
36208	46208	40	80	18	18	2,0	1,0	30 600	28 900
36209	46209	45	85	19	19			32 300	30 400
36210	46210	50	90	20	20			33 900	31 800

шарикоподшипники по ГОСТ 831—75 (рис. 4.13)

Статическая грузо-подъемность C_0 , Н		Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке				Масса G , кг
		Серии 36000 и 66000		Серия 46000		
Серии 36000 и 66000	Серия 46000	консистентной	жидкой	консистентной	жидкой	
к а я с е р и я						
2 500		31 500	40 000			0,03 0,031
2 500		20 000	25 000			0,04
3 580		16 000	20 000			0,068
	8 030			10 000	12 500	0,18
	11 300			8 000	10 000	0,22 0,28
	13 700			6 300	8 000	0,38 0,48
	21 500			5 000	6 300	0,72 0,78 0,90
	25 000			4 000	5 000	1,04
	32 500			4 000	5 000	1,43 1,56
	32 500	—	—	3 150	4 000	2,37 2,38
	40 900					
	43 000					
	45 900					
	48 500					
	74 900					
	82 400					
с е р и я						
3 400	—	25 000	31 500	—	—	0,04
3 900	3 580	20 000	25 000	16 000	20 000	0,045
6 240	5 730					0,06
8 470	7 790	16 000	20 000	12 500	16 000	0,1
9 240	8 500	12 500	16 000	10 000	12 500	0,12
13 300	12 200	10 000	12 500	8 000	10 000	0,19
18 100	16 600					0,27
23 700	27 100	8 000	10 000	6 300	8 000	0,37
25 600	23 600					0,42
27 600	25 400	6 300	8 000			0,47

Условное обозначение подшипника		Размеры подшипника, мм						Динамическая грузоподъемность C , Н	
Серии 36000 и 66000	Серия 46000	d	D	b	T	r	r_1	Серии 36000 и 66000	Серия 46000
36211	46211	55	100	21	21	2,5	1,2	41 900	39 400
36212	46212	60	110	22	22			48 200	45 400
—	46213	65	120	23	23			—	54 400
36214	46214	70	125	24	24			63 000	59 100
—	46215	75	130	25	25	3,0	1,5	—	61 500
36216	46216	80	140	26	26			73 500	68 900
36217	46217	85	150	28	28			79 000	74 000
36218	46218	90	160	30	30			92 800	87 100
36219	—	95	170	32	32	3,5	2,0	110 000	—
36220	46220	100	180	34	34			124 000	110 000
36222	46222	110	200	38	38			146 000	137 000
—	46224	120	215	40	40			—	148 000
Средняя									
—	46303 *	17	47	14	14	1,5	0,5	12 600	
	46304 *	20	52	15	15			14 000	
	46305	25	62	17	17	2,0	1,0	21 100	
	46306	30	72	19	19			25 600	
	46307	35	80	21	21	2,5	1,2	33 400	
	46308	40	90	23	23			39 200	
	46309	45	100	25	25			48 100	
	46310	50	110	27	27			56 300	
66311*	46311 *	55	120	29	29	3,0	1,5	60 600	68 900
—	46312	60	130	31	31			78 800	
—	46313	65	140	33	33			89 000	
66314	46314	70	150	35	35	4,0	2,0	93 300	100 000
	46318	90	190	43	43			129 000	
	46320	100	215	47	47			167 000	

П р и м е ч а и е. Неразъемные подшипники серии 36 000 имеют угловые подшипники серии 66000 имеют угол контакта $\beta = 12^\circ$.

* См. сноску к табл. 4.17.

Статическая грузо-подъемность C_0 , Н		Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке				Масса G , кг	
		Серии 36000 и 66000		Серия 46000			
Серии 36000 и 66000	Серия 46000	консистентной	жидкой	консистентной	жидкой		
34 900	32 100	6 300	8 000			0,58	
40 100	36 800	5 000	6 300	5 000	6 300	0,77	
—	46 800	—	—			0,98	
55 900	51 400	5 000	6 300			1,04	
—	54 800	—	—	4 000	5 000	1,39	
66 000	61 200					1,68	
72 200	66 400	4 000	5 000			1,80	
84 600	77 700			3 150	4 000	2,20	
104 000	—				—	2,60	
118 000	109 000	3 150	4 000	3 150	4 000	3,20	
150 000	138 000				2 500	3 150	4,50
—	153 000	—	—			6,45	
серия							
	8 150			12 500	16 000	0,11	
	9 170					0,17	
	14 900			8 000	10 000	0,23	
	18 700					0,35	
	25 200	—	—	6 300	8 000	0,44	
	30 700					0,63	
	37 700					0,83	
	44 800					1,08	
47 400	57 400	4 000	5 000	5 000	6 300	1,7 (1,45)	
—	66 600	—	—			1,71	
—	76 400	—	—	4 000	5 000	2,09	
78 300	87 000	3 150	4 000	3 150	4 000	3,3 (3,1)	
—	125 000	—	—	2 500	3 150	5,0	
—	180 000					8,14	

контакта $\beta = 12^\circ$, серии 46000 — $\beta = 26^\circ$, серии 66000 — $\beta = 36^\circ$; разъем-

Т а б л и ц а 4.19. Упорные одинарные шарикоподшипники по ГОСТ 6874—75 (рис. 4.14)

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм					Динамическая грузоподъемность C , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке	Масса G , кг
	d	d_1	D	H	r				
О с о б о л е г к а я с е р и я									
8100	10	10,2	24			6 580	11 300		0,02
8101	12	12,2	26			6 970	12 500	5300	0,02
8102	15	15,2	28		9	7 430	13 600	8000	0,024
8103	17	17,2	30			8 220	15 900		0,03
8104	20	20,2	35	10		11 000	21 600	5000	6300 0,04
8105	25	25,2	42	11		12 500	26 200		0,06
8106	30	30,2	47			13 800	29 300	4000	0,07
8107	35	35,2	52	12		16 800	37 200		5000 0,084
8108	40	40,2	60	13		23 000	51 000		0,12
8109	45	45,2	65			24 300	56 100	3150	4000 0,15
8110	50	50,2	70	14		25 700	61 200	4000	0,16
8111	55	55,2	78	16		34 200	83 000	4000	0,24
8112	60	60,2	85	17		37 500	91 500		0,29
8113	65	65,2	90			42 800	104 000	2500	3150 0,34
8114	70	70,2	95	18		46 000	113 000		0,36
8115	75	75,2	100			47 400	118 000		0,42
8116	80	80,2	105	19		48 700	122 000	2000	0,43
8117	85	85,2	110			50 000	132 000		0,46
8118	90	90,2	120	22		61 800	161 000	1600	0,68

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм					Динамическая грузоподъемность C , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения $n_{\text{макс}}$ об/мин, при смазке	Масса G , кг
	d	d_1	D	H	r				
8120	100	100,2	135			81600	218 000	1600	1,0
8122	110	110,2	145	25	1,5	82 900	220 000	2000	1,08
8124	120	120,2	155			88 000	250 000	1250	1,16
Л е г к а я с е р и я									
8201	12	12,2	28	11		8 680	15 400	5000	0,034
8202	15	15,2	32	12		9 870	18 600	6300	0,041
8204	20	20,2	40	14	1,0	15 800	30 600	4000	0,08
8205	25	25,2	47	15		20 400	41 000	5000	0,12
8206	30	30,2	52	16		23 000	47 200	3150	0,14
8207	35	35,2	62	18		31 600	68 000	4000	0,22
8208	40	40,2	68	19		37 500	79 900	2500	0,27
8209	45	45,2	73	20		39 500	90 500	3150	0,32
8210	50	50,2	78	22		46 000	105 000		0,39
8211	55	55,2	90	25	1,5	56 600	129 000	2000	0,61
8212	60	60,2	95	26		65 800	155 000	2500	0,69
8213	65	65,2	100			65 800	158 000		0,75
8214	70	70,2	105	27		65 800	161 000		0,80
8215	75	75,2	110			68 400	169 000	1600	0,86
8216	80	80,2	115	28		76 300	191 000		2000
8217	85	85,2	125	31		94 700	239 000	1250	1,30

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм					Динамическая грузоподъемность C , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке	Масса G , кг		
	d	d_1	D	H	r						
8218	90	90,2	135	35		2,0	112 000	290 000	1250	1,86	
8219	100	100,2	150		38		132 000	335 000			
8222	110	110,2	160				138 000	394 000	1000	2,60	
8224	120	120,2	170	39			145 000	413 000	1250		
Средняя серия											
8305	25	25,2	52	18		1,5	25 700	49 900	3150	4000	0,18
8306	30	30,2	60	21			32 900	67 900	2500	3150	0,27
8307	35	35,2	68	24			40 800	85 000			0,39
8308	40	40,2	78	26			51 300	109 000	2000		0,55
8309	45	45,2	85	28			59 200	133 000		2500	0,69
8310	50	50,2	95	31		2,0	71 000	164 000	1600		1,00
8311	55	55,2	105	35			92 100	217 000			1,34
8312	60	60,2	110	35			92 100	217 000	2000		1,43
8313	65	65,2	115	36			104 000	254 000			1,57
8314	70	70,2	125	40			120 000	298 000	1250		2,10
8315	75	75,2	135		44	2,5	138 000	346 000	1600		2,70
8316	80	80,2	140				138 000	346 000			2,80
8318	90	90,2	155	50			171 000	452 000			3,90
8320	100	100,2	170	55			184 000	490 000	800		5,10
8321	110	110,2	190	63	3,0		230 000	655 000		1000	7,9
8324	120	120,2	210	70	3,5		276 000	829 000	630		10,9

Таблица 4.20. Конические однорядные роликоподшипники
по ГОСТ 333—71 (рис. 4.15)

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм							Динамическая грузо-подъемность C , Н	Статическая грузо-подъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке		Масса G , кг
	d	D	B	C	T	r	r_1			консистентной	жидкой	
Особолегкая серия ($\beta = 11 \div 15^\circ$)												
2007106	30	55	16	14	17			23 500	19 900	6 300		0,169
2007107	35	62	17	15	18			25 600	23 000	5 000	8 000	0,224
2007108	40	68	18			16	19	31 900	28 400			0,27
2007109	45	75	19				20	40 000	34 800	4 000	6 300	0,333
2007111	55	90	22			19	23	49 100	45 200		5 000	0,541
2007113	65	100	22					52 900	51 300			0,62
2007114	70	110	24			20	25	67 600	65 800	3 150	4 000	0,834
2007115	75	115	24					66 000	64 700			0,909
2007116	80	125	27	23	29			88 400	85 500			1,34
2007118	90	140	30					111 000	111 000		3 150	1,63
2007119	95	145	30			26	32	114 000	115 000		2 000	1,75
2007120	100	150	30					117 000	120 000		2 500	1,82

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм							Динамическая грузо-подъемность C_d , Н	Статическая грузо-подъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{max} , об/мин, при смазке		Масса G , кг
	d	D	B	C	T	r	r_1			консистентной	жидкой	
2007122	110	170	36	31	38	3,0	1,0	161 000	166 000	1 600	2 000	2,9
2007124	120	180						169 000	180 000			3,11
Легкая серия ($\beta = 12 \div 16^\circ$)												
7202	15	35	11	9	11,75	1,0	0,3	8 780	6 140	10 000	12 500	0,05
7203	17	40	12	11	13,25	1,5	0,5	13 800	9 300	8 000	12 500	0,07
7204	20	47	14	12	15,25			19 100	13 300			0,12
7205	25	52	15	13	16,25	2,0	0,8	23 900	17 900	6 300	10 000	0,15
7206	30	62	16	14	17,25			29 800	22 300			0,23
7207	35	72	17	15	18,25	2,5	1,0	35 200	26 300	5 000	6 300	0,33
7208	40	80	18	16	19,75			42 400	32 700	4 000	6 300	0,45
7209	45	85	19	16	20,75			42 700	33 400			0,48
7210	50	90	20	17	21,75			52 900	40 600			0,54
7211	55	100	21	18	22,75	3,0	1,0	57 900	46 100	3 150	5 000	0,71
7212	60	110	22	19	23,75			72 200	58 400		4 000	0,89
7214	70	125	24	21	26,25			95 900	82 100	2 500	4 000	1,33
7215	75	130	25	22	27,25	3,0	1,0	97 600	84 500		3 150	1,42
7216	80	140	26	22	28,25			106 000	91 400		3 150	1,67
7217	85	150	28	24	30,25			109 000	95 200	2 000	3 150	2,10
7218	90	160	30	26	32,5	3,0	1,0	141 000	125 000		2 500	2,52

7219	95	170	32	27	34,5	3,5	1,2	145 000	131 000	1 600	2 500	3,20
7220	100	180	34	29	37,0			162 000	146 000	1 600	2 500	3,81
7224H	120	215	40	34	43,5	3,5	1,2	252 000	237 000	1 600	2 000	6,3

Легкая широкая серия ($\beta = 12 \div 16^\circ$)

Условное обозначение подшипника	Размеры подшипника, мм						Динамическая грузоподъемность C_d , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин, при смазке		Масса G , кг	
	d	D	B	C	T	r	r_1		консистентной	жидкой		
Средняя серия ($\beta = 10 \div 14^\circ$)												
7304H	20	52	15	13	16,25			25 000	17 700	8 000	10 000	0,17
7305	25	62	17	15	18,25	2,0		29 600	20 900	6 300	8 000	0,25
7306	30	72	19	17	20,75		0,8	40 000	29 900	5 000	6 300	0,46
7307	35	80	21	18	22,75	2,5		48 100	35 300			0,50
7308	40	90	23	20	25,25			61 000	46 000	4 000	5 000	0,70
7309H	45	100	25	22	27,25			76 100	59 300			1,01
7310H	50	110	27	23	29,25	3,0	1,0	96 600	75 900	3 150		1,33
7311	55	120	29	25	31,5			102 000	81 500		4 000	1,64
7312	60	130	31	27	33,5			118 000	96 300			2,00
7313	65	140	33	28	36,0	3,5	1,2	134 000	111 000			2,54
7314H	70	150	35	30	38,0			168 000	137 000	2 000		3,09
7315	75	160	37	31	40,0			178 000	148 000			3,63
7317	85	180	41	35	44,5	4,0	1,5	221 000	195 000			5,21
7318	90	190	43	36	46,5			240 000	201 000	1 600	2 500	
7320	100	215	47	39	51,5							5,56

Средняя широкая серия ($\beta = 11 \div 15^\circ$)

7604	20	52	21,0	18,5	22,25			29 500	22 000	6 300	10 000	0,236
7605	25	62	24,0	21,0	25,25	2,0		45 500	36 600	5 000	8 000	0,366
7606H	30	72	27,0	23,0	28,75			61 300	51 000		6 300	0,574
7607	35	80	31,0	27,0	32,75	0,8		71 600	61 500	4 000	6 300	0,798
7608	40	90	33,0	28,5	35,25	2,5		80 000	67 200		5 000	1,04
7609	45	100	36,0	31,0	38,25			104 000	90 500	3 150		1,34
7610	50	110	40,0	34,0	42,25	3,0	1,10	122 000	108 000		4 000	1,81
7611H	55	120	43,0	36,0	45,5			148 000	140 000	2 500		2,43
7612H	60	130	46,0	37,0	48,5			171 000	157 000			3,00
7613	65	140	48,0	41,0	51,0	3,5		178 000	168 000			3,63
7614	70	150	51,0	43,0	54,0			204 000	186 000	2 000		4,44
7615	75	160	55,0	46,5	58,0			249 000	235 000			5,38
7616H	80	170	58,0	48,0	61,5			294 000	291 000			6,40
7618H	90	190	64,0	53,0	67,5			369 000	363 000	1 600		8,78
7620	100	215	73,0	61,5	77,5	4,0	1,5	451 000	459 000			13,20
7622	110	240	80,0	66,0	84,5			490 000	505 000			17,80
7624	120	260	86,0	70,5	90,5			601 000	610 000	1 250	1 600	21,90

4.8

КОНТАКТНЫЕ ЩЕТКИ

Контактные щетки используются в электромагнитных СМ при размещении обмотки возбуждения в подвижных частях механизма. В табл. 4.21 и 4.22 приведены типы щеток и их параметры, а в табл. 4.23 — размеры щеток.

Таблица 4.21. Параметры щеток для электрических машин общего применения по ГОСТ 2332—75

Щетка	Марка	Переходное падение напряжения на пару щеток ΔU , В	Плотность тока i , А/см ²	Окружная скорость, v , м/с	Удельное нажатие, $p_{щ} \cdot 10^{-4}$, Па
Графитная	Г3	1,9	11	25	2,0—2,5
	611M	2,0	12	40	2,0—2,5
	6110M	2,0	15	90	1,2—2,2
Угольно-графитная	Г20	2,9	15	40	5,0
	Г21	4,3	5	30	1,5—10
	Г22	2,5	10	30	4,0
Электрографированная	ЭГ2А	2,6	10	45	2,0—2,5
	ЭГ4	2,0	12	40	1,5—2,0
	ЭГ8	2,4	10	40	2,0—4,0
	ЭГ14	2,5	11	40	2,0—4,0
	ЭГ-71	2,2	12	40	2,0—2,5
	ЭГ-74	2,7	15	50	1,75—2,5
Медно-графитная	М1	1,5	15	25	1,5—2,0
	М3	1,8	12	20	1,5—2,0
	М6	1,5	15	25	1,5—2,0
	М20	1,4	12	20	1,5—2,0
	МГ	0,2	20	20	1,8—2,3
	МГ2	0,5	20	20	1,8—2,3
	МГ4	1,1	15	20	2,0—2,5
	МГ64	0,5	20—25	25	1,5—2,0
	МГС5	2,0	15	35	2,0—2,5

Примечания: 1. Коэффициент трения для всех марок щеток принимается равным 0,25. 2. При работе в условиях повышенной вибрации и частотах вращения выше 1500 об/мин удельное нажатие на щетку может быть повышенено до $5 \cdot 10^4$ Па.

Таблица 4.22. Параметры щеток
для электрических машин летательных аппаратов

Марка	Переходное напряжение на пару щеток ΔU , В	Плотность тока i , А/см ²	Окружная скорость v , м/с	Удельное нажатие $p_{\text{щ}} \cdot 10^{-4}$, Па	Коэффициент трения $\mu_{\text{щ}}$	Износ за 50 ч a , мм
МС-6	2,0	15	15	2,5	0,25	0,25
МГС-7	1,6—2,4	27	55	5,0	0,20	0,35
МГС-8	2,0—2,8	28	55	6,0	0,20	0,5
A-8	0,7—1,7	15	15	2,5	0,20	0,2
A-12	1,6	24	15	2,5	0,17	0,25
A-16	2,3	15	40	2,5	0,25	0,15
A-29	3,5	24	40	2,5	0,22	0,2

Рис. 4.16. Размеры щеток

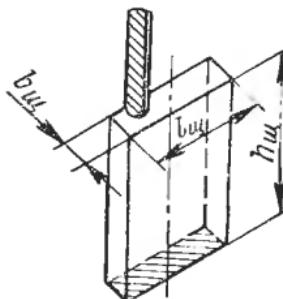


Таблица 4.23. Размеры щеток (мм)
для электрических машин по ГОСТ 12232—71
(рис. 4.16)

Ширина щетки $b_{\text{щ}}$	Длина щетки $l_{\text{щ}}$	Высота щетки $h_{\text{щ}}$	Ширина щетки $b_{\text{щ}}$	Длина щетки $l_{\text{щ}}$	Высота щетки $h_{\text{щ}}$	Ширина щетки $b_{\text{щ}}$	Длина щетки $l_{\text{щ}}$	Высота щетки $h_{\text{щ}}$
1,0	1,6	6,3		2,5	8,0 10,0		4,0	8,0 10,0
		5,0						
	2,0	6,3	2,0	3,2	6,3		5,0	10,0
		8,0			8,0			12,5
1,6		10,0		4,0	10,0			
						2,5		
	2,5	6,3	2,5	3,2	8,0		6,3	12,5
		8,0			10,0			16,0
							10,0	32,0

Ширина щетки <i>b</i> _щ	Длина щетки <i>l</i> _щ	Высота щетки <i>h</i> _щ	Ширина щетки <i>b</i> _щ	Длина щетки <i>l</i> _щ	Высота щетки <i>h</i> _щ	Ширина щетки <i>b</i> _щ	Длина щетки <i>l</i> _щ	Высота щетки <i>h</i> _щ
3,2	4,0	6,3	6,3	10,0	25,0	10,0	40,0	40,0
		8,0			20,0		50,0	
		10,0			25,0			
		12,5						
	5,0	16,0		10,0	32,0		16,0	25,0
								32,0
4,0	6,3	12,5	8,0	12,5	20,0	12,5	20,0	32,0
		16,0			25,0		32,0	
					32,0			
	10,0	10,0		10,0	20,0		40,0	32,0
				25,0	50,0			
		12,5		32,0	64,0			
5,0	6,3	12,5	10,0	12,5	25,0	16,0	50,0	50,0
		16,0			32,0		50,0	64,0
	8,0	16,0		16,0	25,0		20,0	32,0
		20,0		32,0	40,0			
							50,0	
	10,0	25,0		20,0	25,0		25,0	32,0
		16,0		32,0	32,0			
		20,0						

5

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

5.1

КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Электроизоляционные материалы используются в электромагнитных СМ в обмотках возбуждения [39]. Электроизоляционные материалы делятся на классы по нагревостойкости. Изоляции различных классов нагревостойкости имеют следующие допустимые рабочие температуры:

Обозначение класса нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	Свыше 180

Изоляционные материалы, работающие при этих температурах, сохраняют свои свойства в течение длительной эксплуатации (до 20 тыс. ч). Превышение допустимых температур резко снижает надежность и срок службы изоляции. В устройствах общепромышленного назначения используются изоляции классов В, Е и F.

При работе изделия при низких температурах (от —60 до —80° С или криогенных) необходима проверка стойкости электроизоляционных материалов, так как большинство материалов становятся при этом хрупкими и жесткими.

5.2

ПРОПИТОЧНЫЕ ЛАКИ

Пропиточные лаки применяются для пропитки обмоток. Пропитка обмоток осуществляется с целью повышения влаго- и нагревостойкости изоляции, улучшения ее теплопроводности, увеличения механической и электрической прочности. Марки и назначение пропиточных лаков приведены в табл. 5.1.

Недостатком битумно-масляных лаков является термопластичность: лаки не просыхают в толстых слоях. Добавка меламина формальдегидной смолы К-421-02 в некоторой степени улучшает просыхание битумно-масляных лаков в толстых слоях.

Лаки ФА-97 и ФЛ-98 имеют высокую цементирующую способность при рабочих температурах, высокие электрические характеристики, маслостойкость. Лаки пригодны для пропитки обмоток, подвергающихся действию центробежных сил. Недостатком лаков ФЛ-98 и ФА-97 является длительное время сушки (до 16 ч).

Лак ПФЛ-8В представляет собой водную эмульсию. Термореактивен. Обладает удовлетворительной цементирующей способностью и

Таблица 5.1. Электроизоляционные пропиточные лаки

Марка	Вид лака	Область применения	ГОСТ, ТУ
БТ-980	Битумно-масляный	Пропитка обмоток классов нагревостойкости А, Е и В, выполненных проводами с волокнистой и эмальволокнистой изоляцией	ГОСТ 6244—70
БТ-987; БТ-988; ГФ-95	Масляно-алкидные, модифицированные канифолью с добавкой меламинформальдегидной смолы	Пропитка обмоток, требующих стойкости к кислотам	ГОСТ 8018—70
ФА-97	Алкиднофенольный	Пропитка обмоток классов нагревостойкости Е и В	МРТУ 6.10.655—67
ФЛ-98	То же	То же	ГОСТ 12294—66
ПФЛ-8В	Водоэмulsionийный	Пропитка обмоток классов нагревостойкости Е и В	ТУ ОАБ.5.022
ПЭ-933	Полиэфирноэпоксидный	Пропитка обмоток класса нагревостойкости F, в том числе работающих в условиях тропического климата	МРТУ 6.10.714—68

ПЭ-993	Полиэфироизоциануратный	Пропитка обмоток, длительно работающих при температуре 130—155° С (классы В и F)	ТУ 16.504.018—72
КО-991-1	Полиоргансилоксановый	То же	ТУ 6.02.753—73
КО-991-3	То же	»	ТУ 6.02.753—73
КО-964	»	Пропитка обмоток класса нагревостойкости Н повышенной надежности, в том числе морского исполнения. Допускает кратковременную работу при температуре до 250° С	ТУ ОАИ 504.135—70
КО-964Н	»	Пропитка обмоток классов нагревостойкости F и H	ТУ ОАИ 504.135—70
КО-962	»	Пропитка обмоток, длительно работающих при температуре 180° С, кратковременно — при 250° С	МРТУ 6.02.318—64
КО-916К	Полиоргансилоксановый, модифицированный полиэфиром	Пропитка обмоток классов нагревостойкости F и H нормального, морского и тропического исполнений	ТУ 6.02.690—72
ДФ-971	Дифенилоксидный	Пропитка обмоток класса нагревостойкости Н, подвергающихся воздействию агрессивных сред, растворителей, масел	ТУ ОАИ 504.183—73

стойкостью к разбрзгиванию. Не рекомендуется применение лака ПФЛ-8В для пропитки обмоток, выполненных из эмалированных проводов с изоляцией из полиэфирных лаков.

Лак ПЭ-933 имеет высокую цементирующую способность, хорошие электрические характеристики и влагостойкость. Для ускорения высыхания и просыхания в толстом слое в лак добавляют бутоксикрезолформальдегидную смолу РБ. Растворитель и разбавитель лака — смесь толуола и этилцеллозольва.

Лак ПЭ-993 является лаком с ускоренным временем и пониженными температурами сушки и просыхания в толстом слое. Этот лак просыхает в толстом слое быстрее, чем пропиточные лаки класса нагревостойкости В, и при более низкой температуре (130°C), чем лак ПЭ-933 класса нагревостойкости F. Лак отличается высокой цементирующей способностью и хорошими электрическими характеристиками. Растворитель лака — смесь ксиола и циклогексанона, разбавитель — ксиол, циклогексанон.

Лак КО-916К обладает высокой пропиточной способностью, влагостойкостью и хорошей цементирующей способностью, но уступает по нагревостойкости немодифицированным лакам КО-964 и КО-923.

Лаки КО-964 и КО-964Н отличаются высокими нагревостойкостью и электрическими характеристиками. Для достижения оптимальных свойств лаки подвергают длительной термической обработке при высоких температурах (180 — 200°C). Это способствует повышению механических свойств лаковых пленок, маслостойкости, улучшению цементирующей способности. Сушка лаков КО-964Н и КО-964 производится при температурах 150 и 130°C соответственно.

5.3 ПОКРЫВНЫЕ ЛАКИ И ЭМАЛИ

Покрытия лаки и эмали служат для создания защитного электрического покрытия на пропитанных обмотках, а также для покрытия металлов, изоляционных деталей из гетинакса, текстолита и других материалов. Марки покрытий лаков и эмалей и основные области применения приведены в табл. 5.2. Лаки эфироцеллюлозные, а также БТ-99, БТ-982 подвергаются холодной сушке, остальные — горячей. Лак УР-930 изготавливается непосредственно перед употреблением смешанием компонентов.

Покрытия эмали представляют собой красочные суспензии неорганических пигментов в лаках. Пигменты улучшают нагревостойкость и теплопроводность лаковой пленки, повышают ее твердость и атмосферостойкость.

Таблица 5.2. Покрытие лаки и эмали

Марка	Вид лака или эмали	Растворитель	Область применения	ГОСТ, ТУ
Л а к и				
БТ-99	Битумно-масляный	Сольвент, толуол, ксиол или их смеси с уайт-спиритом	Покрытие обмоток	ГОСТ 8017—74
БТ-982 УР-930	То же Полиуретановый, модифицированный фенол-формальдегидной смолой и ацетобутиратцеллюзой	То же Циклогексанон	То же Влагостойкое электроизоляционное покрытие по металлу, керамике, гетинаксу и текстолиту	ТУ 6.10.1273—72 МРТУ 6.10.577—68
ЭП-96	Эпоксидная смола Э-40, модифицированная адипиновой кислотой, с добавлением бутоксикрезолформальдегидной смолы РБ и меламиноформальдегидной смолы К-421-02	Ксиол, толуол	Электроизоляционные влагозащитные покрытия с высокой влагостойкостью и твердостью	МРТУ 6.10.763—68
Э м а л и				
—	Перхлорвиниловая	P-4	Покрытие обмоток, подвергающихся воздействию кислотных и щелочных реагентов	ГОСТ 7313—75
ГФ-92ХС	Масляно-алкидная	Уайт-спирит, толуол	Покрытие неподвижных обмоток. Отделка различных изоляционных деталей	ГОСТ 9151—75

Марки	Вид лака или эмали	Растворитель	Область применения	ГОСТ, ТУ
ГФ-92ГС	Масляно-алкидная	Уайт-спирит, толуол	Покрытие неподвижных и вращающихся обмоток с целью получения твердого, механически прочного покрытия, стойкого к действию минеральных масел	ГОСТ 9151—75
ГФ-927	»	Ксиол	Антикоррозионные и электроизоляционные покрытия	МРТУ 6.10.622—67
ЭП-91 КО-938	Эпоксидная Полиорганосилоксановая, модифицированная эпоксидной смолой	Ксиол, толуол Толуол	Покрытие деталей Ремонт обмоток класса нагревостойкости F. Отделка различных изоляционных деталей	ГОСТ 15943—70 ТУ ОАИ 504.138—71
КО-96	Полиорганосилоксановая, модифицированная бутилметакрилатом	»	Покрытие стальных и алюминиевых деталей, работающих при температуре до 300° С (кратковременно)	ТУ 6.10.997—70
КО-911	Полиорганосилоксановая, модифицированная эпоксидной смолой	»	Ремонт обмоток, узлов и деталей класса нагревостойкости Н. Отделка различных изоляционных деталей	ТУ 16.504.021—72
КО-918	Полиорганосилоксановая	»	Покрытие обмоток и других деталей в тех случаях, когда предъявляются требования более высокой нагревостойкости	ТУ ОАИ 504.081—65
КО-936	То же	»	Покрытие обмоток и других деталей	ТУ 10.504.021—72

5.4 КОМПАУНДЫ

В зависимости от назначения электроизоляционные компаунды разделяются на пропиточные и заливочные. В большинстве случаев заливочные, а также обволакивающие компаунды готовятся на основе известных пропиточных компаундов путем введения в них различных наполнителей и загустителей. Как правило, компаунды готовят на месте потребления по технологической инструкции. Лишь незначительная часть компаундов поставляется в готовом к употреблению виде.

Приготовление компаунда сводится к смешению основного связующего материала с другими, соответствующими рецептуре составными частями: пластификаторами, отвердителями, активными разбавителями и наполнителями. При этом должно быть обеспечено равномерное смешение, удаление газовых пузырей. В зависимости от рецептуры компаунда при его изготовлении применяются различные температуры, время перемешивания и вакуумирования, а также разная последовательность операций смешения.

Многие компаунды обладают ограниченной жизнеспособностью вследствие возрастания вязкости с течением времени, особенно при повышенной температуре. В частности, это относится к эпоксидным компаундам. Марки и области применения компаундов приведены в табл. 5.3, механические свойства некоторых компаундов — в табл. 5.4. Большинство компаундов представляет композиции, состоящие из смолы ЭД-16 (компаунды Д-1, Д-3, Д-112, ЭПК-5, ЭПК-6, УП-5-105А, УП-5-105Б, УП-592, УП-592/1) с различного типа отвердителями и пластифицирующими добавками. Компаунды Д-61, ЭПК-1, ЭМТ-1, УП-503А и УП-503Б — композиции на основе смолы ЭД-20, состав 1 — на основе смолы ЭД-22. Они имеют меньшую вязкость и по сравнению с компаундами на смоле ЭД-16 аналогичного состава имеют лучшую пропиточную способность.

Заливочные компаунды горячего отверждения представляют собой композиции, состоящие из смолы ЭД-16, отвердителя малеинового ангидрида и наполнителя (пылевидного кварцевого песка, фтористого кальция КФ-1). Для компаунда ЭЗК-9 в качестве отвердителя используется метилтетрагидрофталевый ангидрид. Компаунды ЭП-49Д и ЭВН-1 состоят из высокомолекулярных эпоксидных смол, наполнителя (пылевидного кварцевого песка) и различных отвердителей. Для порошкообразных эпоксидных компаундов характерно значительное содержание минерального наполнителя (обычно не менее 150% к связующему). Порошки образуют покрытия, устойчивые к термоударам в интервале температур от -60 до $+150^{\circ}\text{C}$, пригодные для изделий тропического исполнения с нагревостойкостью класса В. Компаунды УП-212 и УП-29 в отличие от компаундов ЭП и ЭВН состоят из низкомолекулярных эпоксидных смол. В состав компаунда УП-29 входит новолачная фенолформальдегидная смола 18 (ГОСТ 14970—69).

Полиуретановые компаунды отличаются друг от друга эластичностью, способностью отверждаться при температурах от 20 до 120°C , обладают высокой удельной ударной вязкостью и высокими электроизоляционными свойствами. Детали, предназначенные для заливки полиуретановыми компаундами, нельзя промывать спиртом или другими реагентами, содержащими активный водород. Такие детали

Т а б л и ц а 5.3. Компаунды

Марка	Вид компаунда	Область применения	ТУ, ВТУ
Д-1; Д-112; ЭЗК-4; ЭПК-5; ЭЗК-9 Д-3; ЭПК-4; ЭПК-6	Эпоксидный, немоди- фицированный Эпоксидный, модифи- цированный полиэфи- рами Эпоксидный, немоди- фицированный То же	Пропитка обмоток » »	— —
Д-61; ЭПК-1; ЭЗК-1 ЭМТ-1; ПК-11	Пропитка многослойных катушек	—	ТУ ОАИ 504.152—72
УП-503-А; УП-503-Б	Пропитка изоляции мето- дами монолит-1 и монолит-2 Пропитка, составы для из- готовления герметизирую- щих компаундов, kleев; хи- мостойкие покрытия	ВТУ 5.250—68	
УП-5-105А; УП-5-105Б	Пропитка и заливка уз- лов, длительно работающих при температуре от —60 до +140° С	ВТУ 5.252—68	
УП-592; УП-592/1	Пропитка, заливка и гер- метизация различной аппара- туры, работающей при тем- пературах от —60 до +100° С	ВТУ 5.224—67; ВТУ 5.223—67	
Д-144	Заливка конструкций, на- сыщенных металлом и пред- назначенных для работы при низких температурах	—	
УП-5-105-1А; УП-5-105-1Б	Заливка аппаратуры, дли- тельно работающей при тем- пературе от —60 до +75° С (1Б) и 140° С (1А)	ВТУ 5.244—68	

10-Н	Эпоксидный, модифицированный полиоргансилоксаном	Изолирование обмоток, а также для изготовления вакуумно-плотных изделий, работающих в интервале температур от -60 до $+220^{\circ}\text{C}$ (кратковременно)	ТУ 6.02.667—72
ЭД-16; ЭД-20 с отвердителем АМ-14	Эпоксидный, отверждаемый ароматическим амином	Пропитка и заливка, стойкая к действию кипящей воды	ТУ ОАЮ 509.026 (на отвердитель АМ-14)
К-115; К-168; К-201	Эпоксидный, модифицированный полиэфиром	Пропитка и заливка, склейка и герметизация различных деталей и узлов аппаратуры	МРТУ 6.05.1251—69
КП-18	Полиэфирный	Пропитка обмоток устройств, длительно работающих в интервале температур от -60 до $+130^{\circ}\text{C}$ и кратковременно при 150°C	ТУ ОАБ 504.017
КП-34; КП-101; КП-103	Полиэфирный, модифицированный полиоргансилоксаном	Пропитка обмоток влагостойкого и тропического исполнений, класса нагревостойкости F	ТУ 16.504.014—72; ТУ 16.504.011—72
ЭПМ-2	Полиэфирный	Компаундирование катушек в процессе их намотки влагостойкого и тропического исполнений с рабочей температурой до 150°C	ТУ ОАЮ 503.005
МБК-1; МБК-2; МБК-3	Метакриловый	Пропитка и заливка вибродостойких аппаратов, работающих в условиях высокой влажности. Рабочие температуры: без наполнителя — класс A, с наполнителем — класс E	ТУ 6.16.1602—71

Марка	Вид компаунда	Область применения	ТУ, ВТУ
K-30	Полиуретановый со стиролом	Пропитка и заливка деталей, работающих в интервале температур от -80 до $+60^{\circ}\text{C}$	ТУ ОАИ 504.162—72
K-31	То же	То же в интервале температур от -80 до $+120^{\circ}\text{C}$	ТУ ОАИ 504.161—72
МФВГ-1; МФВГ-3	Полиоргансилоксановый	Пропитка и промазка обмоток с длительной рабочей температурой 180°C , а также заливка узлов и деталей	ТУ П-104—67
K-67; K-67Ф	То же	Пропитка обмоток с длительной рабочей температурой 180°C , допускают кратковременную работу при температуре до 250°C , K-67 — пропитка обмоток с повышенными требованиями по цементации; K-67Ф — по термоэластичности	ТУ ОАИ 504.144—71
ЭВН-1; ЭП-49Д	»	Напыление по металлу и обмоткам	ТУ ОАЮ 503.001;
УП-212; УП-29	Эпоксидный	Нанесение антикоррозионных, электроизоляционных и влагозащитных покрытий	ТУ 6.05.1420—71 ВТУ 2.256—68

Таблица 5.4. Свойства некоторых компаундов

Свойство	Д-1	Д-3	ЭПК-4	Д-61	Д-112	ЭЗК-1	ЭЗК-4	ЭЗК-9
Плотность ρ , кг/м ³	1230—1250	1230—1250	1230—1250	1230—1250	—	1850	1810	1600—1800
Предел прочности при статическом изгибе $\sigma_{в.и}$, МПа	110—143	100—140	110	98—110	131	140	110	70—120
Предел прочности при сжатии $\sigma_{в.с}$, МПа	105—130	100—130	—	100—120	136	—	—	—
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	60	65	65	60	—	30—34	34	38—40
Теплопроводность λ , Вт/(м· $^{\circ}\text{C}$)	0,16	0,17	0,17	0,16	—	0,755	0,755	0,986
Удельное электросопротивление $\rho_3 \cdot 10^{-8}$, Ом·м, при температуре, $^{\circ}\text{C}$:								
20	10^5	10^4	10^5	10^5	10^4	10^3	10^3	10^5
100	—	—	—	—	—	10^3	10^4	10^4
150	—	—	—	—	—	10	1	1

следует просушить в термостате и провакуумировать в теплом состоянии для удаления влаги. Для получения отливок без пузырей необходимо тщательно соблюдать технологию заливки изделий, а также строго придерживаться режимов отверждения и термообработки полиуретановых компаундов.

В ряде случаев возможно использование битумных компаундов. Они представляют собой нефтяные битумы или сплавы из нефтяных битумов и растительных масел и канифоли. Размягчаются при нагревании и затвердевают при охлаждении. Обладают высокой влагостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами, вследствие чего применяются для получения монолитной изоляции и заполнения неплотностей в неподвижных обмотках влагостойкого исполнения. В качестве разбавителя битумного компаунда 225 (4100) применяется компаунд 225р (4200), обладающий пониженной температурой размягчения.

5.5 КОНДЕНСАТОРНАЯ БУМАГА

Конденсаторная бумага является наиболее тонким и высококачественным видом электроизоляционных бумаг. Номинальная толщина бумаги, допуски на плотность и толщину, номинальное допустимое пробивное напряжение указаны в табл. 5.5 и 5.6.

Т а б л и ц а 5.5. Свойства конденсаторной бумаги по ГОСТ 1908—66

Толщина δ , мкм	Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$, В				
	Силкон 08	Силкон 1	Силкон 2	КОН-1	КОН-2
4	—	—	270	—	240
5	—	—	300	—	260
6	—	—	300	—	280
7	—	320	330	300	310
8	—	340	360	320	330
9	—	360	—	330	—
10	—	380	400	350	370
11	—	400	—	370	—
12	390	420	460	390	430
13	—	440	—	410	—
15	420	460	490	430	450
22	—	530	590	490	560
30	—	620	680	590	620

П р и м е ч а н и е. Плотность конденсаторной бумаги по марки силкон 08 — 800 кг/м³; силкон 1 — 1000 кг/м³; силкон 2 — 1170—1250 кг/м³; КОН-1 — 1000 кг/м³; КОН-2 — 1170—1250 кг/м³.

Таблица 5.6. Допуски на конденсаторную бумагу

5.6

КАРТОН ДЛЯ РАБОТЫ В ВОЗДУХЕ

Электроизоляционный картон применяется для изоляции магнитопроводов, прокладок и других деталей аналогичного назначения. Для уменьшения гигроскопичности картон пропитывается и лакируется лаками и компаундами. Картон изготавливается по ГОСТ 2824—75 марок ЭВС, ЭВП, ЭВТ. В табл. 5.7 приведены основные технические характеристики картона, предназначенного для работы в воздушной среде. Картон марок ЭВП и ЭВТ изготавливается в рулонах шириной 1 м, картон марок ЭВС — в рулонах и листах. Картон марки ЭВТ вырабатывается без применения проклеивающих веществ, картон марки ЭВП проклеивается с целью уменьшения его гигроскопичности канифольным kleем, а картон марки ЭВС, кроме канифольного kleя — крахмалом.

Таблица 5.7. Свойства картонов марок ЭВС, ЭВП и ЭВТ

Свойство	ЭВС	ЭВП	ЭВТ
Толщина δ , мм	0,2—0,4	0,1—0,3	0,1—0,5
Плотность ρ , кг/м ³	1250	1250	1150
Предел прочности при растяжении в продольном направлении σ_b , МПа, не менее:			
в исходном состоянии	120	120	120
после 100 перегибов	72	80	67,5
Электрическая прочность после сушки E_{pr} , МВ/м, не менее:			
при толщине, мм:			
0,1—0,2	12	12	13
0,3—0,4	11	11	12
0,5	—	—	12
после перегиба в продольном направлении при толщине, мм:			
0,1—0,2	9	9	9
0,3—0,5	8	8	8

5.7

ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ИЗ ХЛОПЧАТОБУМАЖНЫХ ВОЛОКОН

Хлопчатобумажные ленты применяются в качестве верхнего защитного слоя изоляции катушек. Необходимо применять более тонкие ленты, но при достаточной их механической прочности. Тафтиная лента часто применяется в качестве временной бандажной ленты при компаундировании катушек. Характеристики хлопчатобумажных лент по ГОСТ 4514—71 приведены в табл. 5.8. Ленты поставляются рулонами с длиной ленты в рулоне 50—60 м. Хлопковое волокно теряет прочность при температуре выше 165° С, при 175—200° С — разрушается.

Таблица 5.8. Характеристика хлопчатобумажных лент

№ запра- вок	Наимено- вание ленты	Ширина ленты <i>a</i> , мм	Толщина ленты <i>δ</i> , мм	Разрыв- ная на- грузка ленты <i>P</i> , не менее Н	Удлинение при разрыве ленты Δl , %, не менее	Масса 100 м длины ленты <i>G</i> , г
1 2 3 4 5 6 7 8 9	Кипер- ная	10±0,5	0,45 ^{+0,02}	137,34	9	187±9
		12±0,5		166,77		232±11
		15±1		206,01		276±14
		20±1,5		255,06		361±18
		25±1,5		313,91		462±23
		30±1,5		362,97		543±27
		35±2		421,83		637±31
		40±2		470,88		723±36
		50±2		568,98		902±45
1 2 3 4 5 6 7 8 9	Тафтя- ная	10±0,5	0,25 ^{+0,02}	88,29	8	100±5
		12±0,5		107,91		120±6
		15±1		127,53		152±7
		20±1,5		156,96		199±10
		25±1,5		176,58		244±12
		30±1,5		206,01		291±14
		35±2		225,63		338±17
		40±2		255,06		384±19
		50±2		313,91		480±24
1 2 3 4	Тафтя- ная разре- женная	15±1	0,40 ^{+0,02}	127,53	8	143±7
		20±1,5		156,96		186±9
		25±1,5		176,58		233±11
		30±1,5		206,01		300±15
1 2 3 4 5 6 7	Митка- левая	12±0,5	0,22 ^{+0,02}	177,72	5	126±6
		16±1		156,96		168±8
		20±1,5		186,39		209±10
		25±1,5		225,63		253±13
		30±1,5		264,87		297±15
		35±2		304,11		340±17
		40±2		343,35		387±20

№ запра- вок	Наимено- вание ленты	Ширина ленты a , мм	Толщина ленты δ , мм	Разрыв- ная на- грузка ленты P , не менее Н	Удлинение при разрыве ленты Δl , %, не менее	Масса 100 м дли- ны ленты G , г
1	Батисто- вая	$10 \pm 0,5$	$0,18^{+0,02}$	58,86	4	84 ± 5
2		$12 \pm 0,5$		78,48	5	93 ± 4
3		16 ± 1		107,91		128 ± 6
4		$20 \pm 1,5$		127,53		150 ± 7
1		10 ± 1	$0,16^{+0,01}$	58,86	4	74 ± 3
2		12 ± 1		68,67		82 ± 4
3		16 ± 1		93,2		108 ± 5
4		$20 \pm 1,5$		112,81		132 ± 7
5		12 ± 1	$0,12^{+0,01}$	58,86		82 ± 4
6		16 ± 1		78,45		108 ± 5
7		$20 \pm 1,5$		93,2		132 ± 7

5.8 СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Стеклянные ленты используются для защитной изоляции катушек. Стеклянное волокно имеет высокую нагрево- и химостойкость. Для электрической изоляции используется бесщелочное алюмосиликатное или алюмоборосиликатное стекло. Стеклянная ткань сохраняет прочность при нагреве до 250°C . При адсорбции воды происходит понижение прочности до 50—60%. Пропитка стекловолокнистых материалов лаками повышает их прочность на 80—100%. В сухом воздухе прочность стеклянных волокон резко повышается.

Электропроводность стеклянных тканей является в основном поверхностной, а электросопротивление зависит от влажности и температуры (табл. 5.9).

Теплопроводность стекловолокнистых материалов чрезвычайно мала и для изделий из стеклянного волокна при температуре 25°C составляет $0,030\text{--}0,035\text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$, плотных тканей $0,47\text{--}0,058\text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$. Сортамент и характеристики лент приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.9. Влияние влажности воздуха и температуры на удельное электросопротивление стеклянных тканей

Состав стекла	Удельное электросопротивление $\rho_3 \cdot 10^{-9}$, Ом·м, при относительной влажности воздуха, %				
	20	40	60	80	100
Бесщелочное алюмоборосиликатное	$2 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^2$	90	3,4
Состав стекла	Удельное электросопротивление $\rho_3 \cdot 10^{-15}$, Ом·м, при температуре, °C				
	50	100	150	200	250
Бесщелочное алюмоборосиликатное	1	5	3	0,4	0,02

Таблица 5.10. Ленты, вырабатываемые на бесщелочных станках

Марка ленты	Ширина ленты a , мм	Толщина ленты δ , мм	Разрывное усилие ленты по основе P , Н, не менее	Масса 100 м длины ленты G , г
ЛЭСБ-0,1×10	10 ± 1	$0,1 \pm 0,01$	150	149 ± 14
ЛЭСБ-0,1×12	12 ± 1	$0,1 \pm 0,01$	210	170 ± 17
ЛЭСБ-0,1×14	14 ± 1	$0,1 \pm 0,01$	230	198 ± 20
ЛЭСБ-0,1×16	16 ± 1	$0,1 \pm 0,01$	340	226 ± 23
ЛЭСБ-0,1×20	20 ± 1	$0,1 \pm 0,01$	350	283 ± 28
ЛЭСБ-0,1×25	25 ± 2	$0,1 \pm 0,01$	500	351 ± 36
ЛЭСБ-0,1×30	30 ± 2	$0,1 \pm 0,01$	580	425 ± 43
ЛЭСБ-0,15×10	10 ± 1	$0,15 \pm 0,015$	200	494 ± 50
ЛЭСБ-0,1×35	32 ± 2	$0,1 \pm 0,01$	630	180 ± 18
ЛЭСБ-0,15×15	15 ± 1	$0,15 \pm 0,015$	350	226 ± 26
ЛЭСБ-0,15×20	20 ± 1	$0,15 \pm 0,015$	500	350 ± 35
ЛЭСБ-0,15×25	25 ± 2	$0,15 \pm 0,015$	650	440 ± 44
ЛЭСБ-0,15×30	30 ± 2	$0,15 \pm 0,015$	800	570 ± 57
ЛЭСБ-0,15×35	35 ± 2	$0,15 \pm 0,015$	950	620 ± 62
ЛЭСБ-0,15×40	40 ± 2	$0,15 \pm 0,015$	1100	703 ± 70
ЛЭСБ-0,2×10	10 ± 1	$0,2 \pm 0,02$	200	235 ± 23
ЛЭСБ-0,2×15	15 ± 1	$0,2 \pm 0,02$	350	340 ± 34
ЛЭСБ-0,2×20	20 ± 1	$0,2 \pm 0,02$	500	450 ± 45

Марка ленты	Ширина ленты <i>a</i> , мм	Толщина ленты <i>δ</i> , мм	Разрывное усилие ленты по основе <i>P</i> , <i>H</i> , не менее	Масса 100 м длины ленты <i>G</i> , г
ЛЭСБ-0,2×30	30±2	0,2±0,02	800	675±67
ЛЭСБ-0,2×35	32±2	0,2±0,02	950	790±79
ЛЭСБ-0,2×40	40±2	0,2±0,02	1100	904±90
ЛЭСБ-0,2×45	45±2	0,2±0,02	1250	988±99
ЛЭСБ-0,2×50	50±2	0,2±0,02	1400	1090±101
ЛЭСБ-У-0,1×15	15±2	0,1±0,01	300	190±19
ЛЭСБ-У-0,1×20	20±1	0,1±0,01	400	250±25
ЛЭСБ-У-0,1×25	25±2	0,1±0,01	500	320±32
ЛЭСБ-У-0,1×30	30±2	0,1±0,01	600	380±38
ЛЭСБ-У-0,15×20	20±1	0,15±0,015	800	380±38
ЛЭСБ-У-0,15×25	25±2	0,15±0,015	1000	470±47
ЛЭСБ-У-0,15×30	30±2	0,15±0,015	1200	560±56
ЛЭСБ-У-0,15×35	35±2	0,15±0,015	1400	650±65
ЛЭСБ-У-0,15×40	40±1	0,15±0,015	1600	740±74
ЛЭСБ-У-0,2×20	20±1	0,2±0,02	800	470±47
ЛЭСБ-У-0,2×25	25±2	0,2±0,02	1000	560±56
ЛЭСБ-У-0,2×30	30±2	0,2±0,02	1200	650±65
ЛЭСБ-У-0,2×35	35±2	0,2±0,02	1400	740±74
ЛЭСБ-У-0,2×40	40±2	0,2±0,02	1600	830±83
ЛЭСБ-У-0,25×20	20±1	0,25±0,025	800	530±53
ЛЭСБ-У-0,25×25	25±2	0,25±0,025	1000	660±66
ЛЭСБ-У-0,25×30	30±2	0,25±0,025	1200	790±79
ЛЭСБ-У-0,25×35	35±2	0,25±0,025	1400	920±92
ЛЭСБ-У-0,25×40	40±2	0,25±0,025	1600	1090±101

5.9. ФТОРОПЛАСТЫ

Фторопласт используется в качестве конструкционного материала, а также для изготовления электроизолирующих деталей (колодок, трубок) и защитных покрытий. Наиболее распространены фторопласт-4 (ГОСТ 10007—72) и фторопласт-4Д (ГОСТ 14906—77). Фторопласт-4Д отличается от фторопласта-4 формой и размерами частиц, а также меньшей молекулярной массой. Физико-механические свойства фторопласта-4 и фторопласта-4Д практически одинаковы.

Фторопласт-40 (ВТУ М-817—59) и фторопласт-42 (ВТУ 208—62) уступают по ряду свойств фторопласту-4, но обладают большей твердостью и почти не склонны к ползучести. Фторопласт-42 в отличие от прочих фторопластов растворим в кетонах и сложных эфирах. Это позволяет применять фторопласт-42 для получения защитных пленок. Фторопласт-40Д (МРТУ 6-05-894—64) представляет собой суспензию тонкодисперсного порошка фторопласта-40 в спиртовой среде. Предназначается для получения электроизоляционных покрытий.

Свойства фторопластов приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11. Свойства фторопластов

Свойства	Фторопласт-4	Фторопласт-40	Фторопласт-42
Плотность ρ , кг/м ³	2150 *	1650	1980
Предел прочности σ_b , МПа:			
при растяжении	14—31,5	30—45	30—50
при статическом изгибе	11—14	33—34	25—33 **
Модуль упругости при изгибе E , МПа, при температуре, °С:			
—60	1320—2780	1540	2050
+20	470—850	950	405
Удельное электросопротивление $\rho_e \cdot 10^{-15}$, Ом·м	1—10	1	$2 \cdot 10^{-6}$
Электрическая прочность E_{pr} , МВ/м, при толщине б:			
4 мм	25—27	—	—
2 мм	—	—	—
5—20 мкм	200—250	—	—
Удельная теплоемкость c , кДж/(кг·°С)	1,05	—	—
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	0,234	—	—
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^5$, ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹ , от 60 до +280°С	8—21	—	—
Максимальная длительная рабочая температура $t_{\text{раб.}}$, °С	250	—	—

* При степени кристалличности 49,7%.

** Образцы не разрушаются, а только прогибаются.

5.10

ПРОПИТАННЫЕ ВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общими свойствами пропитанных волокнистых материалов (лакотканей) являются высокая механическая прочность при малой толщине, гибкость, эластичность, стойкость к действию влаги и незначительная водопоглощаемость.

Лакоткани используются в виде различных лент, прокладок, оберточ и т. п. Лакоткани в виде лент применяются как нарезанными параллельно основе ткани, так и в диагональном направлении под углом около 45°. Параллельно нарезанные ленты обладают незначительным удлинением (кроме лент на основе тканей из шелковых и синтетических волокон). Классификация электроизоляционных лакотканей приведена в табл. 5.12, а свойства — в табл. 5.13—5.17.

Таблица 5.12. Классификация
электроизоляционных лакотканей

Группа	Вид лакоткани	Марка	ГОСТ, ТУ
Хлопчато-бумажные и шелковые лакоткани	Масляная хлопчатобумажная Полиэфирная хлопчатобумажная Битумно-масляная хлопчатобумажная Масляная шелковая Масляная капроновая	ЛХМ-105; ЛХМС-105; ЛХММ-105 ЛХП-105 ЛХБ-105 ЛШМ-105; ЛШМС-105 ЛКМ-105; ЛКМС-105	ГОСТ 2214-70 ТУИ 76.919.019-71 ГОСТ 2214-70 ГОСТ 2214-70 ГОСТ 2214-70
Стекло-лакоткани	Масляная Битумно-масляно-алкидная Полиэфирно-эпоксидная Кремнийорганическая Кремнийорганическая пигментированная Кремнийорганическая полупроводящая	ЛСМ-105/120; ЛСММ-105/120 ЛСБ-120/130 ЛСП-130/155 ЛСП-К ЛСК-155/180 ЛСК-1, ЛСК-2 ЛСК-5	ГОСТ 10156-70 ГОСТ 10156-70 ГОСТ 10156-70 ГОСТ 5541-76 ГОСТ 10156-70 ТУ 16.503.011-67 ТУ 16.503-095-71
Стекло-лакоткани на основе фторопластов	Фторопластовая	Ф-4Д-Э01; Ф-4Д-Э003 Ф-40Д-Э01; Ф-40Д-Э003	ТУ 6.05.1444-71 ТУ 6.03.1444-71
Резино-стекло-лакоткани	Латексная Эскапоновая Кремнийорганическая	ЛСЛ-105/120 ЛСЭ-105/130 ЛСКР-180	ГОСТ 10156-70 ГОСТ 10156-70 ГОСТ 10156-70

Таблица 5.13. Свойства хлопчатобумажных и шелковых тканей

Марка	Номинальная толщина δ , мм	Среднее отклонение от номинальной толщины $\Delta\delta$, мм	Среднее пробивное напряжение $U_{пр}$ в состоянии растяжения, кВ	Удельное электросопротивление $\rho_э \cdot 10^{-7}$, Ом·м, при $105^\circ C \pm 2^\circ C$	Масса 1 м ² G , г
ЛХМ-105; ЛХП-105	0,15	$\pm 0,02$	3,5	2—40	165
	0,17		4,0		185
	0,20		4,8		235
	0,24		5,2		285
	0,30	(+0,02) — (-0,03)	5,5		350
ЛХМС-105	0,17 0,20	$\pm 0,02$	4,3 5,0	6—1000	185 235
ЛХММ-105	0,17	$\pm 0,02$	4,5	10—5000	185
	0,20		5,2		235
	0,24		5,6		285
ЛХБ-105	0,17	$\pm 0,02$	4,2	30—700	185
	0,20		5,0		235
	0,24		5,2		285
ЛШМ-105	0,08	$\pm 0,01$	2,7	4—500	80
	0,10		3,0		100
	0,12	(+0,01) — (-0,02)	3,5		125
	0,15		4,0		160
	0,10 0,12 0,15	(+0,01) — (-0,02)	3,0 3,6 4,5		100 125 160
ЛШМС-105	0,10	(+0,01) — (-0,02)	3,0	8—1000	100
	0,12		3,6		125
	0,15		4,5		160
ЛКМ-105	0,10	$\pm 0,01$	3,0	5—1000	100
	0,12	(+0,01) — (-0,02)	4,0		125
	0,15		4,6		160
ЛКМС-105	0,10	$\pm 0,01$	3,7	10—1000	100
	0,12	(+0,02) — (-0,01)	4,5		125
	0,15	(+0,01) — (-0,02)	5,0		160

Таблица 5.14. Свойства стеклолакотканей

Марка	Номинальная толщина δ , мм	Среднее отклонение от номинальной толщины $\Delta\delta$, мм	Среднее пробивное напряжение теплоты $U_{пр}$, кВ	Удельное электросопротивление $\rho_9 \cdot 10^{-7}$, Ом · м	Масса 1 м ² G , г
ЛСМ-105/120	0,15	$\pm 0,02$	3,6	10 при 120°C	195
	0,17		4,1		230
	0,20		4,6		260
	0,24		5,6		300
ЛСММ-105/120	0,17		4,5		230
	0,20		5,0		260
	0,24		6,0		300
	0,12	(+0,01) — (-0,02)	3,7		160
ЛСБ-120/130	0,15	$\pm 0,02$	5,5	10 при 130°C	195
	0,17		6,0		230
	0,20		7,1		260
	0,24		7,7		300
	0,08	$\pm 0,01$	1,6		95
ЛСП-130/155	0,10	(+0,01) — (-0,02)	2,4	1 при 155°C	120
	0,12		3,1		160
	0,15	$\pm 0,02$	3,7		195
	0,17		4,2		230
ЛСП-К	0,08	$\pm 0,01$	1,6		95
	0,10	(+0,01) — (-0,02)	2,4		120
	0,12		3,1		160
	0,15	$\pm 0,02$	3,8		195
	0,17		4,4		230
ЛСК-150/180	0,05	$\pm 0,01$	—	100 при 180°C	55
	0,06	$\pm 0,01$	0,7		70
	0,08		1,5		95
	0,10	(+0,01) — (-0,02)	3,0		120
	0,12	$\pm 0,02$	3,3		160
	0,15		4,5		195
ЛСК-1	0,12	$\pm 0,02$	1,8		160
	0,15		2,2		195
	0,2	$\pm 0,03$	3,0		260
ЛСК-2	0,12	$\pm 0,02$	2,0		160
	0,15		3,0		195
	0,2	$\pm 0,03$	4,5		260

Таблица 5.15. Свойства стеклотканей на основе фторопластов

Марка	Номинальная толщина δ , мм	Предельное отклонение от номинальной толщины $\Delta\delta$, мм	Среднее пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$, кВ	Удельное электросопротивление $\rho_3 \cdot 10^{-13}$, Ом · м	Рабочая температура t_p , °C	Предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{в. р.}}$, кН/м²
Ф-4Д-Э01	0,2	(+0,02) — (-0,1)	10,0	1,0	(-60) — (+125)	15,0
Ф-4Д-Э003	0,055	±0,15	2,75			10,0
Ф-40Д-Э01	0,2	(+0,02) — (-0,1)	20,0	20,0	(-60) — (+200)	28,0
Ф-40Д-Э003	0,06	(+0,02) — (-0,15)	9,6	9,3		15,0

Таблица 5.16. Свойства резиностеклотканей

Марка	Номинальная толщина δ , мм	Предельное отклонение от номинальной толщины $\Delta\delta$, мм	Среднее пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$, кВ	Удельное электросопротивление $\rho_3 \cdot 10^{-9}$, Ом · м	Рабочая температура t_p , °C	Предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{в. р.}}$, кН/м²	Масса 1 м² G , г
ЛСЛ-105/120	0,15	±0,02	5,0	1,0	120	10,5	185
	0,17		5,4			13,0	215
	0,20	±0,03	5,8			15,0	240
	0,24		6,5			17,0	280
ЛСЭ-105/130	0,12	(+0,01) — (-0,02)	3,7		130	9,0	150
	0,15	±0,02	5,2			10,5	185
	0,17		5,8			13,0	215
	0,20		6,8			15,0	240
	0,24		7,8			17,0	280
ЛСКР-180	0,12		2,1	10	200	9,0	160
	0,15		3,0			10,5	195
	0,17		3,1			13,0	230
	0,20		4,2			15,0	260

Таблица 5.17. Предел прочности на растяжение хлопчатобумажных, шелковых и стеклолакотканей

Марка	Номинальная толщина δ , мм	Предел прочности на растяжение σ_b, p , кН/м ²		
		по основе	по утку	под углом 45° к основе
ЛХМ-105	0,15	4,5	3,5	3,0
ЛХП-105	0,17	5,1	3,6	3,2
ЛХМС-105	0,20	6,4	4,0	3,6
ЛХММ-105	0,24	7,5	5,2	4,5
ЛХБ-105	0,30	8,0	6,0	5,5
ЛШМ-105; ЛШМС-105	0,04 0,05 0,06 0,08	1,0 1,4 1,8 2,2	0,7 0,9 1,1 1,5	0,7 0,9 1,1 1,5
ЛШМ-105	0,1	2,4	1,7	1,7
ЛКМ-105	0,12	2,5	1,8	1,8
ЛКМС-105	0,15	3,0	2,2	2,2
Стеклолакоткани	0,05 0,06 0,08 0,10 0,12 0,15 0,17 0,20 0,24	2,5 3,0 4,5 6,0 9,0 10,5 13,0 15,0 17,0	— — — — — — — — —	— — — — — — — — —

Масляные хлопчатобумажные лакоткани обладают высокими электрическими свойствами, большой прочностью при растяжении, устойчивостью к воздействию минеральных масел, бензина и воды. К недостаткам этих лакотканей следует отнести повышенную склонность к тепловому старению, проявляющуюся в быстром нарастании жесткости при воздействии тепла. Полиэфирные хлопчатобумажные лакоткани по свойствам близки к масляным хлопчатобумажным лакотканиям, но отличаются большей устойчивостью к тепловому старению. Битумно-масляные хлопчатобумажные ткани по механическим свойствам не отличаются от масляных хлопчатобумажных лакотканей, но обладают более высокими электрическими свойствами, повышенной влагостойкостью и менее склонны к тепловому старению. Битумно-масляные лакоткани нестойки к действию масел и бензина. Масляные шелковые лакоткани отличаются значительно меньшей толщиной, повышенными электрическими свойствами. Масляные капроновые лакоткани обладают большой эластичностью и превосходят по этому показателю все электроизоляционные лакоткани. Недостатками масляных капроновых лакотканей являются большая усадка при воздействии тепла и недостаточная стойкость к кратковременному повышению температур, когда резкое возрастание температуры может привести к расплавлению нитей капроновой ткани.

Хлопчатобумажные и шелковые лакоткани имеют следующие назначения:

ЛХМ-105, ЛХБ-105, ЛХП-105 — для работы на воздухе при нормальных климатических условиях;

ЛХСМ-105 (с повышенными электрическими свойствами) — то же; допускается работа в трансформаторном масле;

ЛХММ-105 — для работы в горячем трансформаторном масле (с температурой до 105° С);

ЛШМ-105 (с малой усадкой и стойкостью к кратковременному повышению температуры) — для работы на воздухе при нормальных климатических условиях;

ЛШМС-105 (с повышенными электрическими свойствами) — то же; допускается работа в трансформаторном масле;

ЛКМ-105 (с повышенной эластичностью) — для работы на воздухе при нормальных климатических условиях;

ЛКМС-105 (с повышенными электрическими свойствами) — то же; допускается работа в трансформаторном масле.

Для изготовления всех видов стеклотканей применяется электроизоляционная стеклянная ткань из стекловолокна на основе стекла алюмоборосиликатного состава. В зависимости от типа пропиточного лака стеклоткани выпускаются классов нагревостойкости от А до Н.

Свойства масляных стеклотканей аналогичны свойствам масляных хлопчатобумажных лакотканей, но благодаря применению стекловолокна в качестве волокнистой оси они обладают большей прочностью при растяжении и повышенной нагревостойкостью класса Е. Битумно-масляно-алкидные стеклолакоткани относятся к классу нагревостойкости В. По механическим свойствам не отличаются от масляных стеклолакотканей. Обладают более высокими электрическими характеристиками и повышенной влагостойкостью; эластичность их ниже, чем у масляных, однако так же, как битумно-масляные хлопчатобумажные лакоткани, недостаточно бензино- и маслостойки. Полиэфирноэпоксидные стеклолакоткани относятся к классу нагревостойкости F. Стеклолакоткани обладают наиболее высоким пробивным напряжением по сравнению с другими стеклолакотканями. Отличаются большей стабильностью свойств в процессе длительного нагрева при рабочей температуре и хорошей масло- и бензиностойкостью. Кремнийорганические стеклолакоткани относятся к классу нагревостойкости Н, отличаются малой зависимостью электрических свойств от температуры и воздействия влажной среды, стойки к действию тропического климата. К недостаткам кремнийорганических стеклолакотканей относятся пониженная маслостойкость и недостаточная устойчивость к действию органических растворителей. Кремнийорганические пигментированные стеклолакоткани по сравнению с кремнийорганическими стеклолакотканями обладают более низкими электрическими свойствами и меньшей эластичностью. Поэтому они находят применение главным образом в качестве прокладок и других изоляционных деталей, которые не подвергаются значительному изгибу и растяжению. Относятся к классу нагревостойкости Н.

Стеклоткани имеют следующие назначения:

ЛСМ-105/120 — для работы на воздухе при нормальных климатических условиях;

ЛСММ-105/120 — для работы в горячем трансформаторном масле (с температурой до 105° С);

ЛСБ-105/120 — для работы на воздухе при повышенной влажности (относительная влажность 95 ± 2% при 20 ± 2° С);

ЛСП-130/155 — для работы на воздухе при повышенной влажности, допускается работа в горячем трансформаторном масле;

ЛСП-К (с повышенными свойствами) — то же;

ЛСК-155/180 — для работы на воздухе при повышенной влажности (включая тропические условия);

ЛСК-1 (пигментированная жесткая) — для работы на воздухе при температуре до 180° С и повышенной влажности (включая тропическую);

ЛСК-2 (мягкая) — то же.

Стеклоткани на основе фторопласта отличаются высокими нагревостойкостью, электрическими характеристиками и химостойкостью. Основой является ткань из алюмоборосиликатного волокна. Разновидностью стеклолакотканей являются резиностеклолакоткани. Для них характерна повышенная эластичность.

5.11

СЛОИСТЫЕ ПЛАСТИКИ

Слоистые пластики представляют собой материалы, изготовленные посредством прессования или намотки пропитанных или лакированных связующим волокнистых наполнителей. В зависимости от применяемого наполнителя слоистые пластики имеют наименования:

Наполнитель	Слоистый пластик
Целлюлозная бумага	Листовой гетинакс
»	Бумажно-бакелитовый
Асbestosвая бумага, листовой электронит	Листовой асбогетинакс
Хлопчатобумажная или синтетическая ткань	Текстолит
Хлопчатобумажная ткань и целлюлозная бумага	Текстогетинакс
Асbestosвая ткань	Асботекстолит
Стеклянная ткань	Стеклотекстолит

Листовой гетинакс представляет собой слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев целлюлозной бумаги, пропитанной термореактивной смолой.

Гетинакс применяется для деталей электроизоляционного назначения, работающих при температуре от —60 до +105° С. Листовой текстолит представляет собой слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой резольного типа.

Электротехнический листовой текстолит применяется как электроизоляционный материал для эксплуатации при температуре от —60 до +150° С в условиях нормальной относительной влажности при частоте 50 Гц или в трансформаторном масле.

В отличие от гетинакса текстолит обладает повышенным сопротивлением раекалыванию и более высокой способностью к механической обработке, а также повышенным сопротивлением к истиранию. В связи с этим текстолит рекомендуется применять для изготовления деталей и изделий сложной конфигурации и работающих на трение. В табл. 5.18 даны области применения слоистых пластиков, а в табл. 5.19—5.20 — их данные и свойства.

Таблица 5.18. Области применения слоистых пластиков

Наименование и марка	Класс нагревостойкости	Область применения	Наименование и марка	Класс нагревостойкости	Область применения	Наименование и марка	Класс нагревостойкости	Область применения
Гетинакс I	A	Панели	Текстогетинакс ПГТ	A	Детали с повышенными требованиями по качеству штамповки по сравнению с деталями из гетинакса	Асбогетинакс А-2	F	Детали, работающие при рабочей температуре 155°С на воздухе, в том числе детали тропического исполнения
» II		То же, материал имеет более широкие допуски по толщине и величине коробления						
» III		Детали с несколько повышенными требованиями по влагостойкости	Текстолитовые стержни		Детали цилиндрической формы с повышенными требованиями по механической прочности	Стеклотекстолит СТК	H	Детали, работающие на воздухе при температуре до 180°С нормального и тропического исполнения
» IV		Детали, работающие при тропической влажности и температуре						
Текстолит А		Детали, работающие на трение	Стеклотекстолит СТ	B	Детали, работающие на воздухе при рабочей температуре 130°С. Детали нормального и тропического исполнения	Асбогетинакс Н-І	C (рабочая температура до 300°С)	Детали низковольтной аппаратуры (до 1000 В и промышленной частоты тока), работающие на воздухе
» Б		Детали сложного профиля, в том числе получающиеся штамповкой						
Текстолит ЛТ	У	Детали, к которым предъявляются требования неизменяемости размеров при увлажнении	Стеклотекстолит СТ-II	F	То же, с повышенной жесткостью при рабочей температуре и стабильностью размеров			

Т а б л и ц а 5.19. Номинальная толщина листов
слоистых пластиков

Материал	Марка	Номинальная толщина σ , мм
Гетинакс	I	0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50
	II	То же, начиная с 0,4
	III	То же, начиная с 5
	IV	То же, начиная с 2
Текстолит	A, Б	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 3,8; 4,0; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 24; 25; 26; 28; 30; 32; 33; 35; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50
	ЛТ	0,3; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 3,8
Стеклотексто- лит	СТ	1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30
	СТ-II	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5
	СТК	То же и далее 4; 4,5; 5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30
Асбогетинакс	A-2	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30
	H-1	0,7; 2,8
Текстогетинакс	ПГТ	0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3

Таблица 5.20. Свойства слоистых пластиков

Свойства	I	II	III	IV	A	Б	ЛТ	A-2	Н-1	ПГТ	СТ	СТ-II	СТК
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	1,35— 1,45	1,35— 1,45	1,30— 1,40	1,28— 1,38	1,30— 1,45	1,30— 1,45	1,25— 1,35	1,60— 1,70	1,80— 1,90	1,30— 1,45	1,60— 1,80	1,60— 1,90	1,60— 1,80
Предел прочности σ_b^* , МПа, не менее:													
при статическом изгибе перпендикулярно слоям	100	100	100	60	70 (80)	80 (95)	130	140	60	80	95	—	—
при растяжении	80	80	70	60	35 (45)	45 (55)	45	—	—	55	70	100	90
Теплопроводность λ , Вт/(м × × °C), при температуре, °C:													
20				0,037			0,035		—	0,33	—	0,32	—
200				—			—	—	0,69	—	0,55	—	0,27 0,60
Коэффициент линейного рас- ширения $\alpha \cdot 10^5$, ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹				2,0—3,5			2,4		—				
Модуль упругости при рас- тяжении $E \cdot 10^{-3}$, МПа				10—18			4,0—6,5		—				18—21
Удельное электросопротив- ление $\rho_s \cdot 10^{-8}$, Ом · м, среднее логарифмическое при темпера- туре $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ и относитель- ной влажности $65 \pm 15\%$	1	1	10^2	10^3	1	0,1	10^3	1	1	1	5	10^2	10^2

* Данные пластиков марок I, II, III и IV приведены для листов толщиной 1 мм и более; марок А, Б и ЛТ — для листов толщиной от 1 до 9,5 мм, в скобках — при толщине 10 мм и более; остальных марок — для листов толщиной 10 мм и более.

5.12 ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

В настоящем параграфе приведены данные наиболее распространенных обмоточных проводов круглого и прямоугольного сечений, их сортамент и характеристики. Выбор проводов должен производиться в соответствии с классом их нагревостойкости.

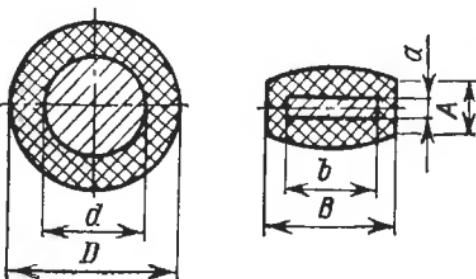


Рис. 5.1. Изоляция круглых и прямоугольных проводов

Т а б л и ц а 5.21. Толщина изоляции

Марка	Круглый провод при диаметре					
	0,06— 0,09	0,10— 0,18	0,20— 0,25	0,28	0,31— 0,35	0,40— 0,50
ПБО	—	—	0,10	0,12	0,12	0,12
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22
ПДА	—	—	—	—	—	—
ПСД	—	—	—	—	0,23	0,23
ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18
ПЭТВ;	0,02	0,022— 0,030	0,030— 0,035	0,035	0,035— 0,04	0,040— 0,055
ПЭТ-155						
ПЭТВП;	—	—	—	—	—	—
ПЭТП-155						
ПЭЛ, ПЭТ	0,015	0,02	0,025	0,04	0,04	0,04— 0,05
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165
ПЭЛКО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165
ПЭЛШКО;	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11
ПЭЛШО						
ПЭТСО	—	—	—	—	—	0,20
ПЭТСОТ	—	—	—	—	—	0,16
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14

П р и м е ч а н и я: 1. Приведена двусторонняя толщина изоляции: означают, что провода данных размеров не изготавливают.

В табл. 5.21—5.23 приведены номинальные диаметры и размеры обмоточных проводов. В табл. 5.24 — характеристики основных марок проводов и их изоляции. На рис. 5.1 показано сечение круглых и прямоугольных проводов.

5.13

ПРОВОДА И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ

В данном параграфе описаны провода и электроизоляционные материалы с длительной рабочей температурой 300° С и выше. Для получения таких материалов используются главным образом неорганические полимерные соединения, а также кремнийорганические полимеры. Жаростойкие провода в зависимости от используемой изоляции можно разделить на две основные группы: провода со стеклокерамической изоляцией и провода со стекловолокнистой изоляцией.

В табл. 5.25—5.29 приведены марки проводов и их свойства. Для пропитки обмоток из жаростойких проводов применяются пропиточные составы на основе золей ортокремниевой кислоты С-6М и С-8М.

обмоточных проводов, мм

голой меди, мм					Прямоугольный провод при размере меди по стороне a , мм		
0,56— 0,63	0,71— 0,95	1,00— 1,40	1,50— 2,12	2,24— 2,50	0,80— 1,90	2,0—3,75	4,0— 4,25
0,12	0,12	0,14	0,14	—	0,14	0,175	0,23
0,22	0,22	0,27	0,27	—	0,27	0,33	0,44
—	—	0,30	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40
0,25	0,25	0,27	0,27	0,33	0,27	0,33	0,40
0,25	0,25	0,27	0,27	0,33	0,27	0,33	0,40
0,19	0,20	0,21—0,23	0,23	—	—	—	—
0,055—	0,060—	0,080—	0,085—	0,10	—	—	—
0,060	0,065	0,085	0,100	—	—	—	—
—	—	—	—	—	0,12	0,18	—
0,05	0,06	0,07— 0,08	0,08— 0,10	0,10	—	—	—
0,17	0,18	0,21	0,21	—	—	—	—
0,17	0,18	0,21	0,21	—	—	—	—
0,115	0,125	0,135	0,155	—	—	—	—
0,20	0,22	0,22—0,24	0,24	—	—	—	—
0,16	0,18	0,20—0,21	0,21	—	—	—	—
0,16	0,16	0,18	0,22	—	0,22	0,22	—

($D - d$) — для круглого провода; $A - a$ — для прямоугольного. 2. Прочерки

Таблица 5.22. Номинальные диаметры и площади поперечного сечения круглых неизолированных проводов

Диаметр d , мм	Сечение g , мм^2	Диаметр d , мм	Сечение g , мм^2	Диаметр d , мм	Сечение g , мм^2
0,06	0,00283	0,35	0,0962	1,12	0,985
0,07	0,00385	0,40	0,1257	1,18	1,094
0,08	0,00503	0,45	0,1590	1,25	1,227
0,09	0,00636	0,50	0,1963	1,32	1,368
0,10	0,00785	0,56	0,246	1,40	1,539
0,112	0,00985	0,63	0,312	1,50	1,767
0,12	0,01131	0,71	0,396	1,60	2,011
0,14	0,01539	0,72	0,407	1,70	2,27
0,16	0,0201	0,75	0,442	1,8	2,54
0,18	0,0255	0,80	0,503	1,9	2,83
0,20	0,0314	0,85	0,567	2,00	3,14
0,224	0,0394	0,90	0,636	2,12	3,53
0,25	0,0491	0,95	0,709	2,24	3,94
0,28	0,0616	1,00	0,785	2,36	4,36
0,31	0,0755	1,06	0,883	2,50	4,91

Таблица 5.23. Номинальные размеры и площади поперечного сечения (мм²) прямоугольных неизолированных проводов по ГОСТ 434—78

b, мм	a, мм														
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80
2,00	1,436	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,735	—	1,905	—	2,160	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—
2,36	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677
3,00	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637
5,30	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205	—	8,265	—	9,177
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717
6,00	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165	—	10,51	—	11,70
7,10	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29	—	11,79	—	13,14
8,00	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04
8,50	—	—	—	—	—	—	9,303	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94
9,00	—	—	—	—	—	—	9,865	10,410	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74
10,00	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64

b, мм	a, мм														
	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25
2 2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24 2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,50 2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,80 3,00	4,957 —	5,237 5,638	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15 3,35	5,622 —	5,937 6,337	6,315 —	6,693 7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55 3,75	6,382 —	6,737 7,137	7,163 —	7,589 8,037	7,829 —	8,326 8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,00 4,25	7,237 —	7,637 8,137	8,117 —	8,597 9,157	8,891 —	9,451 10,08	10,65 —	10,85 11,35	—	—	—	—	—	—	—
4,50 4,75	8,187 —	8,637 9,137	9,117 —	9,717 10,28	10,07 —	10,70 11,33	11,38 —	12,05 12,75	12,95 —	13,63 14,41	—	—	—	—	—
5,00 5,30	9,137 —	9,637 10,24	10,24 —	10,84 11,51	11,25 —	11,95 12,70	12,70 —	13,45 14,29	14,45 —	15,20 16,15	16,20 —	17,20 18,27	—	—	—
5,60 6,00	10,28 —	10,84 11,64	11,51 —	12,18 13,08	12,67 —	13,45 14,45	14,29 —	15,13 16,25	16,25 —	17,09 18,35	18,21 —	19,33 20,75	20,14 —	21,54 23,14	—
6,30 6,70	11,61 —	12,24 13,04	12,99 —	13,75 14,65	14,32 —	15,20 16,20	16,15 —	17,09 18,21	18,35 —	19,30 20,56	20,56 —	21,82 23,24	22,77 —	24,34 25,94	25,92
7,10	13,13	13,84	14,69	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32
7,50 8,00	— 14,84	14,64 15,64	— 16,60	16,44 17,56	— 18,33	18,20 19,45	— 20,65	20,45 21,85	— 23,45	23,08 24,65	— 26,25	26,08 27,85	— 29,14	29,14 31,14	— 33,14
8,50 9,00	— 16,74	16,64 17,64	— 18,72	18,68 19,80	— 20,69	20,70 21,95	— 23,30	23,25 24,65	— 26,45	26,23 27,80	— 29,60	29,63 31,40	— 32,89	33,14 35,14	— 37,39
9,50 10,00	— 18,64	18,64 19,64	— 20,84	20,92 22,04	— 23,05	23,20 28,45	— 25,95	26,05 27,45	— 29,45	29,38 30,95	— 32,95	33,18 34,95	— 36,64	37,14 39,14	— 41,64

Таблица 5.24. Основные марки медных изолированных обмоточных проводов

Марка	ГОСТ, ТУ	Характеристика провода	Класс нагревостойкости	Максимальная допустимая температура, °C
ПЭЛ	ГОСТ 2773—78	Круглый, эмалированный лакостойкий	A	105
ПЭТ		Круглый, эмалированный лакостойкий, с повышенной нагревостойкостью	E, B	125
ПЭТ-2		Круглый; с двухслойной эмалью		155 (длительно); 180 (700 ч)
ПЭТВ	ОСТ 16.0.505-001—74	Круглый, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкости		130 (длительно); 200 (500 ч)
ПЭТ-155	ГОСТ 21428—75			
ПЭТВМ	ТУ 16.505.370—72			
ПЭТМ	ТУ МИ 395—76			
ПЭТВП	ГОСТ 17708—72	То же, прямоугольный		
ПЭТП-155	ТУ МВ 505.265—74			
ПЭЛШО; ПЭЛШКО	ГОСТ 16512—70	Круглый и прямоугольный, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из натурального шелка (ПЭЛШО) или шелка капрон (ПЭЛШКО)	A	105
ПЭЛКО		То же, с одним слоем утолщенного шелка капрон		
ПЭЛЬБО		Круглый и прямоугольный, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи		

Марка	ГОСТ, ТУ	Характеристика провода	Класс нагревостойкости	Максимальная допустимая температура, °С
ПБО	ГОСТ 16512—70	Круглый и прямоугольный, изолированный одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи	A	105
ПБД		То же, с двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи		
ПЭТСО	ГОСТ 7019—71	Круглый и прямоугольный, изолированный эмалью и одним слоем обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	B	130
ПЭТСОТ		Нагревостойкий, круглый и прямоугольный, изолированный эмаль-лаком и одним слоем обмотки из утонченного бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком		
ПСД		Круглый и прямоугольный, изолированный двумя слоями обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	F	155

Марка	ГОСТ, ТУ	Характеристика провода	Класс нагревостойкости	Максимальная допустимая температура, °С
ПСДТ	ГОСТ 7019—71	Нагревостойкий, круглый и прямоугольный, изолированный двумя слоями обмотки из утонченного бесщелочного стекловолокна с подклейкой нагревостойким лаком	F	155
ПДА		То же, с одним слоем асбестовой ровницы с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком		
ПСДК		То же, с двумя слоями обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	H	180
ПСДКТ	ГОСТ 16508—70	Особо теплостойкий, круглый и прямоугольный с утонченной двухслойной обмоткой из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	H	180 (длительно); 300 (250 ч)

Т а б л и ц а 5.25. Провода со стеклокерамической изоляцией

Марка	ТУ	Материал жилы	Изоляция	Максимально допустимая температура, °C
ПЭСК	ТУ 017.120—65	Биметалл (медь, пла-кированная никелем)	Стекло-эмаль 374М	400 (длительно); 500 (2000 ч)
ПЭЖБ	ТУ 017.25—63	То же	Стекло-эмаль М-33, органо-силикатный состав Ц-5	
ПЭЖБ-700	ТУ МИ 040—67	Биметалл (серебро, пла-кированное никелем)	Стеклоке-рамический состав ТК-40, орга-носили-катный со-став Т-11	500 (длительно); 600 (2000 ч); 700 (500 ч)

П р и м е ч а и и е. В марке провода буквы обозначают: П — про-вод, Э — эмалированный, СК — стеклокерамическая изоляция, Ж — жаростойкий, Б — биметаллический.

Т а б л и ц а 5.26. Размеры проводов со стеклокерамической изоляцией

Марка	Диаметр жилы, мм	Толщина изоляции, мм
ПЭСК	0,1—0,64	0,015—0,04
ПЭЖБ	0,2—0,8	0,02—0,05
ПЭЖБ-700	0,31—0,8	0,03—0,05

Т а б л и ц а 5.27. Провода со стекловолокнистой изоляцией

Марка	ТУ	Материал жилы	Изоляция	Максимально допустимая температура, °С
ПНСДК-1	ТУ 017.168—65	Медь никелированная	Алюмоборосиликатное стекловолокно, эмаль КО-912	В воздухе: 250 (5000 ч); 300 (1500 ч); 400 (300 ч) В вакууме 350 (10 000 ч)
ПНСДКТ-1	ТУ 017.168—65			В воздухе: 250 (2500 ч); 300 (1000 ч); 400 (150 ч) В вакууме 350 (10 000 ч)
ПОЖ-12а	ТУ 017.119—68	Сплав 204, защищенный гальваническим слоем железа и никеля	Бесщелочное стекловолокно с замасливателем 652, эмаль КО-12а	В вакууме 600 (длительно)
ПОЖ	ТУ 017.53—64	Медь никелированная	То же, состав Ц-5	В воздухе: 500 (500 ч); 600 (150 ч)
ПОЖ-600	ТУ 034—67	Сплав 204, защищенный гальваническим слоем железа и никеля	Кварцевая нить К-110, стекловолокно НС150/2 с замасливателем 652, состав Ц-5	В воздухе: 400 (20 000 ч); 500 (1000 ч); 600 (200 ч); 700 (50 ч)

П р и м е ч а н и е. В марке провода буквы обозначают: П — провод, Н — нагревостойкий, С — стекловолокнистая изоляция, Д — двойной слой, К — кремнийорганическое связующее, Т — тонкая изоляция, О — обмоточный, Ж — жаростойкий.

Таблица 5.28. Размеры проводов со стекловолокнистой изоляцией

Марка	Форма жилы	Диаметр d , мм, или сечение g , мм^2 , жилы	Толщина изоляции, мм
ПНСДК-1	Круглая	0,27—2,10	0,24—0,33
	Прямоугольная	2—20	0,35—0,52
ПНСДКТ-1	Круглая	0,27—2,10	0,16—0,26
	Прямоугольная	2—20	0,22
ПОЖ-12а	Круглая	0,31—2,10	0,26—0,31
	Прямоугольная	2—20	0,33—0,50
ПОЖ	Круглая	0,31—2,10	0,28—0,33
	Прямоугольная	2—20	0,35—0,52
ПОЖ-60	Круглая	0,31—3,05	0,30—0,41
	Прямоугольная	2—20	0,47—0,84

Таблица 5.29. Свойства жаростойких обмоточных проводов

Свойство	Форма провода	ПНСДК-1	ПНСДКТ-1	ПОЖ-12а	ПОЖ	ПОЖ-600	ПЭСК	ПЭЖБ	ПЭЖБ-700
Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$, В, при температуре, $^{\circ}\text{C}$, не менее: 15—35	Круглая	550	450	600	600	600	200—300	250—550	300
	Прямоугольная	550	450	600	600	600	—	—	—
400 ± 10	Круглая	550	450	—	—	450	—	200 *	—
	Прямоугольная	550	450	—	—	450	—	—	—
600 ± 10	Круглая	—	—	250	200	—	—	—	300 **
	Прямоугольная	—	—	250	500	—	—	—	—

* При 500°C .

** При 700°C .

6

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СММ

6.1 СТАНДАРТЫ, ИСПЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИЙ СММ

При разработке конструкций СММ должен быть использован ряд ГОСТов: шкала мощностей определяется ГОСТ 12139—74; номинальные частоты вращения — ГОСТ 10683—73; высоты осей вращения для механизмов с горизонтальной осью — ГОСТ 13267—73; установочные размеры электродвигателей, определяющие присоединительные размеры СММ при соединении СММ и двигателей, — ГОСТ 12126—71 и ГОСТ 18709—73; длины и диаметры выступающих концов валов — ГОСТ 12080—66 и ГОСТ 12081—72; призматические шпонки — ГОСТ 8788—68; сегментные — ГОСТ 8794—68, призматические высокие — ГОСТ 10748—68; конструкция и размеры фланцев экранов муфт, работающих при перепаде давлений до 20,0 МПа при температуре до 530° С, — ГОСТ 12831—67. Фланцы могут привариваться к тонкостенной части экрана или выполняться заодно с ним. Фланцы рассчитаны на плоские прокладки из фторопласта или резины при их неограниченном сжатии. В технически обоснованных случаях допускается использование шлицевых цилиндрических концов валов по ГОСТ 1133—71.

В зависимости от вида присоединяемого электродвигателя частота вращения (об/мин) принимается из ряда: для двигателей постоянного тока: 25; 50; 75; 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 1000, 1500, 3000, 4000, 6000, 7500, 10 000, 12 500, 15 000, 20 000, 30 000, 40 000, 60 000; для синхронных двигателей: 100, 125, 150, 166,6; 187,5; 214,3; 250, 300, 375; 500, 600, 750, 1000, 1500, 3000, 4000, 6000, 8000, 10 000, 12 000, 15 000, 20 000, 24 000, 30 000, 40 000, 60 000; для асинхронных двигателей: 100, 125, 150, 166,6; 187,5; 250, 300, 375, 500, 600, 750, 1000, 1500, 3000, 4000, 6000, 8000, 10 000, 12 000, 15 000, 18 000, 20 000, 24 000, 30 000, 36 000, 40 000, 48 000, 60 000. В ряде специальных приводов значения частот вращения могут отличаться от указанных.

Мощность (кВт) должна соответствовать ряду: 0,001; 0,0016; 0,0025; 0,0040; 0,0060; 0,010; 0,016; 0,025; 0,040; 0,060; 0,090; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800.

Магнитные механизмы с горизонтальной осью вращения, соединяемые с электродвигателями, во всех конструктивных исполнениях должны иметь в соответствии с ГОСТ 13267—73 номинальные значения высот оси вращения (мм): 25, 28; 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000.

КОНСТРУКЦИЯ И РАЗМЕРЫ ВЫСТУПАЮЩИХ КОНЦОВ ВАЛОВ

Выступающие концы валов могут изготавляться следующих исполнений: цилиндрические без шпонки; цилиндрические со шпонкой; цилиндрические без шпонки с резьбовым концом; цилиндрические шли-

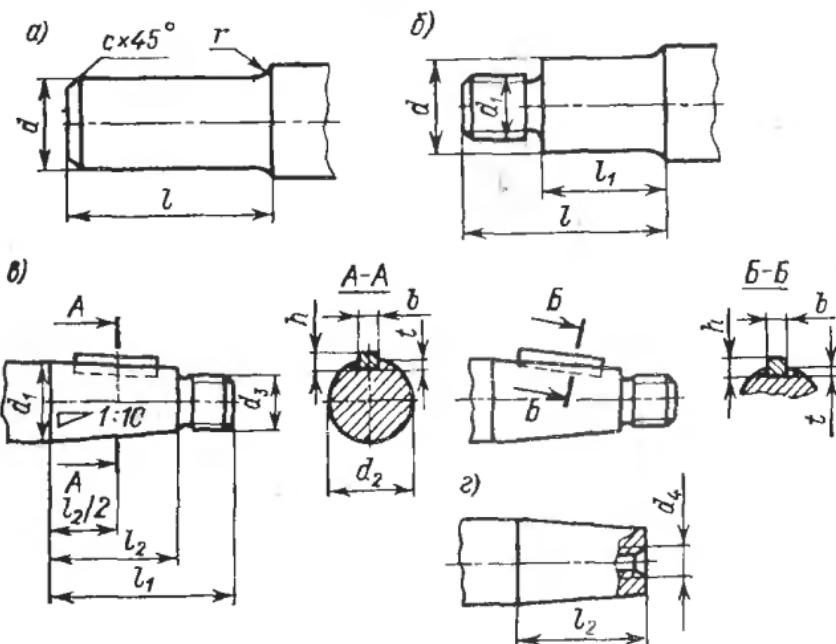


Рис. 6.1. Конструкция концов валов: а — цилиндрический; б — цилиндрический с резьбой; в — конический с наружной резьбой; г — конический с внутренней резьбой

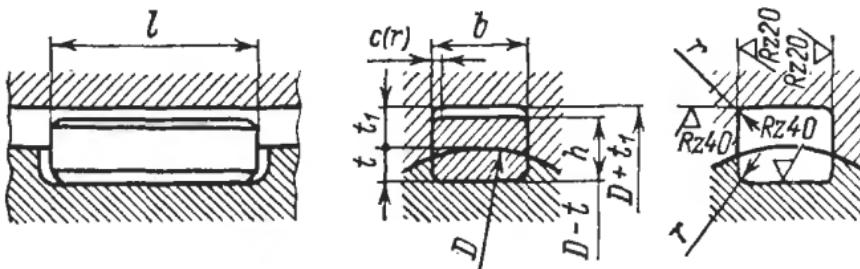


Рис. 6.2. Призматическая шпонка и паз для нее

цевые; конические без шпонки с резьбовым концом; конические со шпонкой и резьбовым концом; конические со шпонкой и внутренней резьбой.

Конструкции концов валов показаны на рис. 6.1. Размеры цилиндрических концов валов приведены в табл. 6.1 и 6.2, конических — в табл. 6.3. Размеры шпонок и пазов приведены в табл. 6.4—6.6. Конструкции их приведены на рис. 6.2—6.4.

Таблица 6.1. Размеры цилиндрических концов валов, мм

d	l		r	c	d	l		r	c					
	Исполнение					Исполнение								
	1	2				1	2							
0,8 1,0	3				20 22 24	50	36	1,6	1,0					
1,2 1,3	4				25 28	60	42	1,6	1,0					
1,6	5		0,2		30 32 36 38	80	58							
1,8 2,0	8				40 42 45 48	100	82	2,0	1,6					
2,5 2,8 3,0	10	—			50 55									
3,8 4,0	12				60 63 65 70 75	140	105	2,5	2,0					
5,0	14		0,4											
6,0 7,0	16													
8,0 9,0	20													
10 11	23	20	0,6	0,4	80 85 90 95	170	130							
12 14	30	25			100 110 120 125	210	165	3,0	2,5					
16 18 19	40	28	1,0	0,6										

Таблица 6.2. Размеры цилиндрических концов валов с резьбой, мм

d	l	l_1	d_1	d	l	l_1	d_1
1,8	8	5	M1,6	20			
2,0				22	50	36	M12×1,25
2,5		6		24			
2,8	10		M2	25	60	42	M16×1,5
3,0		7		30			
3,8	12	8	M3	32			M20×1,5
4,0				36	80	58	
5,0	14	9		38			M24×2
6,0	16	10	M4	40			M24×2
7,0				42			
8,0	20	12	M5	45	110	82	M30×2
9,0				48			
10	23	15	M6	50			M36×3
11				55			
12	30	18	M8×1	60			M42×3
14				63			
16	40	28	M10×1,25	65	140	105	
18				70			M48×3
19				75			
				80	170	130	M56×4

Таблица 6.3. Размеры конических концов валов, мм

d_1	l_1		l_2		d_2		b	h	t	d_3	d_4						
	Исполнение																
	1	2	1	2	1	2											
3	10		7		2,65		—	—	—	M2							
4	12		8		3,60		—	—	—	M3							
5	14		9		4,55		—	—	—	M4							
6	16		10		5,50		—	—	—	M4							
7					6,50		—	—	—								
8	20		12		7,40		—	—	—	M6							
9					8,40		—	—	—								
10	23		15		9,25		—	—	—	M6							
11					10,25		2	2	1,2								
12	30		18		11,10		2	2	1,2	M8×1	M4						
14					13,10		3	3	1,8								

d ₁	l ₁		l ₂		d ₂		b	h	t	d ₃	d ₄
	Исполнение				1	2					
	1	2	1	2	1	2					
16					14,60	15,20	3	3	1,8		M4
18	40	28	28	16	16,60	17,20	4	4	2,5	M10×1,25	M5
19					17,60	18,20					
20					18,20	18,90	4	4	2,5		
22	50	36	36	22	20,20	20,90				M12×1,25	M6
24					22,20	22,90					
25	60	42	42	24	22,90	23,80	5	5	3,0	M16×1,5	M8
28					25,90	26,80					
30					27,10	28,20					
32					29,10	30,20				M20×1,5	M10
35	80	58	58	36	32,10	33,20					
36					33,10	34,20	6	6	3,5		
38					35,10	36,20					M12
40					35,90	37,30	10			M24×2	
42					37,90	39,30					
45					40,90	42,30	8			M30×2	
48	110	82	82	54	43,90	45,30	12			M36×3	M16
50					45,90	47,30					
55					50,90	52,30	14	9	5,5		
56					51,90	53,30					
60					54,75	56,50				M42×3	M20
63					57,75	59,50	16	10	6,0		
65					59,75	61,50					
70	140	105	105	70	67,75	66,50					
71					65,75	67,50	18	11	7,0	M48×3	M24
75					69,75	71,50					
80					73,50	75,50	20	12	7,5	M56×4	
85					78,50	80,50					M30
90	170	130	130	90	83,50	85,50	22			M64×4	
95					88,50	90,50		14	9,0		M36
100					91,75	94,00	25			M72×4	
110					101,75	104,00				M80×4	
120	210	165	165	120	111,75	114,00	28	16	10,0	M90×4	M42
125					116,75	119,00					M48

Таблица 6.4. Размеры призматических шпонок и пазов, мм

<i>D</i>	<i>b</i> × <i>h</i>	<i>t</i>	<i>t</i> ₁	<i>l</i>	<i>r</i> _{min}	<i>r</i> _{max}
6—8 8—10	2×2 3×3	1,2 1,8	1,0 1,4	6—20 6—36	0,08	0,16
10—12 12—17 17—22 22—30	4×4 5×5 6×6 8×7	2,5 3,0 3,5 4,0	1,8 2,3 2,8 3,3	8—45 10—56 14—70 18—90	0,16	0,25
30—38 38—44 44—50 50—58 58—65	10×8 12×8 14×9 16×10 18×11	5,0 5,0 5,5 6,0 7,0	3,3 3,3 3,8 4,3 4,4	22—110 28—140 36—160 45—180 50—200	0,25	0,4
65—75 75—85 85—95 95—110 110—130	20×12 22×14 25×14 28×16 32×18	7,5 9,0 9,0 10,0 11,0	4,9 5,4 5,4 6,4 7,4	56—220 63—250 70—280 80—320 90—360	0,4	0,6

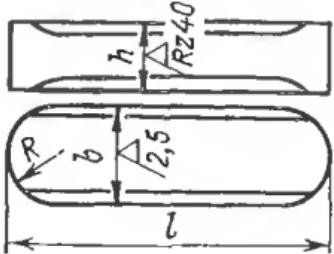
Таблица 6.5. Размеры высоких призматических шпонок и пазов, мм

<i>D</i>	<i>b</i> × <i>h</i>	<i>l</i>	<i>r</i> _{min}	<i>r</i> _{max}
30—38 38—44 44—50 50—58 58—65	10×9 12×11 14×12 16×14 18×16	22—110 18—140 36—160 45—180 50—200	0,25	0,4
65—75 75—85 85—95 95—110 110—130	20×18 22×20 25×22 28×25 32×28	56—220 63—250 70—280 80—320 90—360	0,4	0,6

Таблица 6.6. Размеры сегментных шпонок
и пазов, мм

<i>D</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>d</i> ₁	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>t</i> ₁	<i>r</i> _{min}	<i>r</i> _{max}
3—4	1	1,4	4	3,8	1	0,6	—	0,05
4—6	1,5	2,6	7	6,8	2	0,8		
6—8	2	2,6	7		1,8	1,0	0,08	0,16
		3,7	10	9,7	2,9			
	2,5	3,7	10	9,7	2,9			
8—10	3	3,7	10	9,7	2,5	1,4		
		5,0	13	12,6	3,8			
		6,5	16	15,7	5,3			
10—12	4	5,0	13	12,6	3,5	1,8		
		6,5	16	15,7	5,0			
		7,5	19	18,6	6,0			
		9,0	22	21,6	7,5			
12—17	5	6,5	16	15,7	4,5	2,3	0,16	0,25
		7,5	19	18,6	5,5			
		9,0	22	21,6	7,0			
		10,0	25	24,5	8,0			
17—22	6	9	22	21,6	6,5	2,8		
		10	25	24,5	7,5			
		11	28	27,3	9,5			
		13	32	31,4	10,5			
22—30	8	11	28	27,3	8	3,3		
		13	32	31,4	10			
		15	38	37,1	12			
30—38	10	13	32	31,4	10	0,25	0,40	
		15	38	37,1	12			
		16	45	43,1	13			
		17	55	50,8	14			
38—44	12	19	65	59,1	16			

Исполнение 1



Исполнение 2

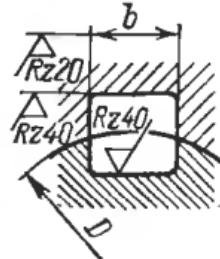
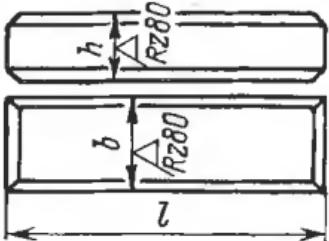


Рис. 6.3. Высокая призматическая шпонка и паз для нее

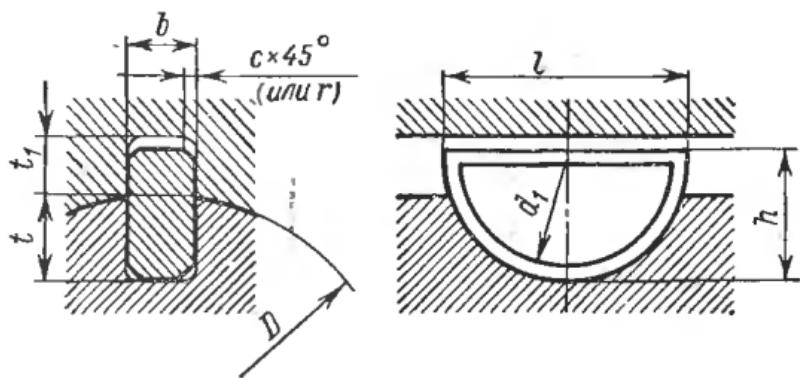


Рис. 6.4. Сегментная шпонка и паз для нее

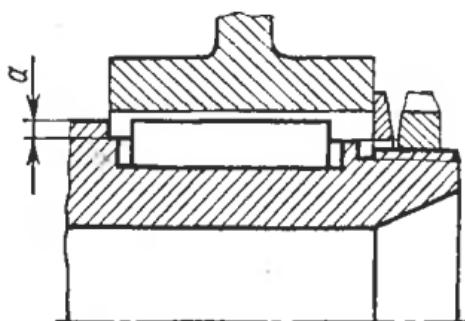
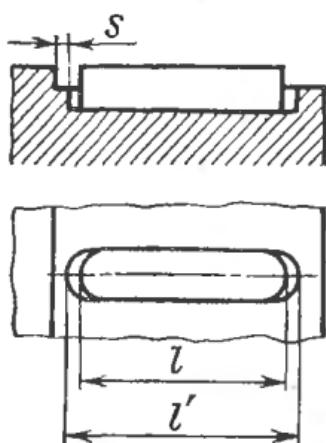


Рис. 6.5. Схема установки призматической шпонки в закрытый паз

Длина шпонок (мм) берется из ряда длин: 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 140, 160, 180, 200.

Схема установки шпонки показана на рис. 6.5. Длина паза под шпонку l' делается на 0,5—1 мм длиннее длины шпонки l . При этом

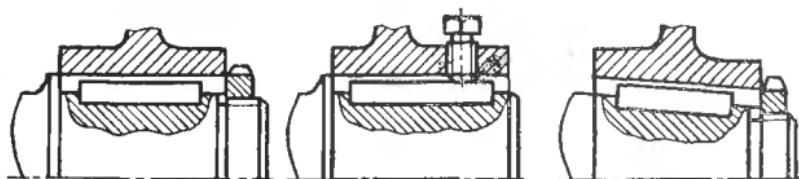


Рис. 6.6. Варианты затяжки шпонок

величина $S = 2 \div 3$ мм для валов диаметром до 30 мм и $S = 4 \div 5$ мм при больших диаметрах. Высота a берется 1—4 мм. Целесообразно прорезать паз до торца вала. Для повышения надежности шпоночного соединения применяется затяжка соединения с помощью гаек или болтов. Варианты затяжки приведены на рис. 6.6.

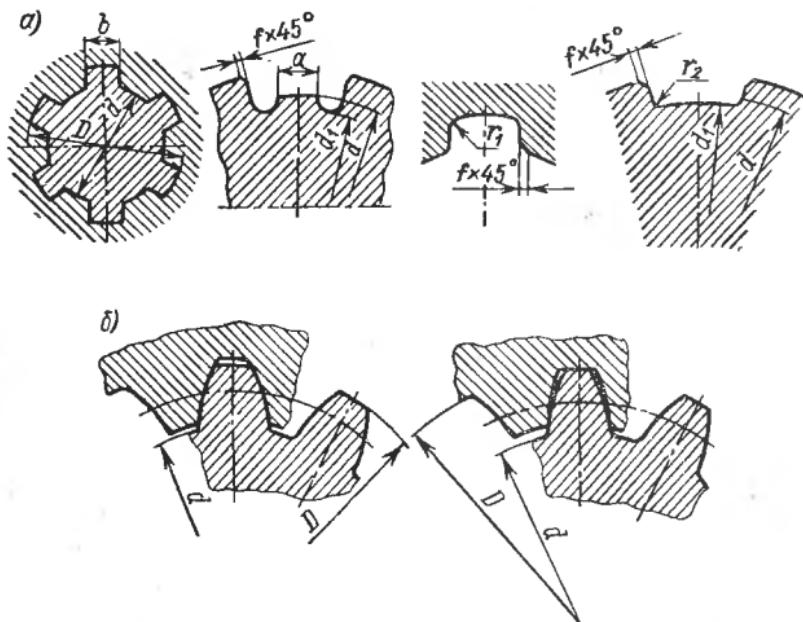


Рис. 6.7. Конструкция шлицевых соединений прямобочного (а) и эвольвентного (б) профиля

Для шлицевых соединений используются шлицы прямоугольного или эвольвентного профиля. Конструкция шлицев показана на рис. 6.7, размеры приведены в табл. 6.7 и 6.8. Внутренний диаметр шлицев следует увеличить на 20% по сравнению с диаметром вала. Входные кромки шлицев делаются с фасками. Для фиксации детали на шлицевом валу можно использовать осевую затяжку.

Таблица 6.7. Размеры прямобочных шлицевых соединений, мм

$Z \times d \times D$	b	$d_1 \geqslant$	$a \geqslant$	f	$r \leqslant$
-----------------------	-----	-----------------	---------------	-----	---------------

Л е г к а я с е р и я

6×23×26	6	22,1	3,54	0,3 ^{+0,2}	0,2
6×26×30	6	22,4	3,85	0,3 ^{+0,2}	0,2
6×28×32	7	26,7	4,03	0,3 ^{+0,2}	0,2
8×32×36	6	30,4	2,71	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×36×40	7	34,5	3,46	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×42×46	8	40,4	5,03	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×46×50	9	44,6	5,75	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×52×58	10	49,7	4,89	0,5 ^{+0,3}	0,5
8×56×62	10	53,6	6,38	0,5 ^{+0,3}	0,5
8×62×68	12	59,8	7,31	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×72×78	12	69,6	5,45	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×82×88	12	79,3	8,62	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×92×98	14	89,4	10,08	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×102×108	16	99,9	11,40	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×112×120	18	108,9	10,72	0,5 ^{+0,3}	0,5

С р е д н я я с е р и я

6×11×14	3	9,9	—	0,3 ^{+0,2}	0,2
3×13×16	3,3	12,0	—	0,3 ^{+0,2}	0,2
6×16×20	4	14,54	—	0,3 ^{+0,2}	0,2
6×18×22	5	16,7	—	0,3 ^{+0,2}	0,2
6×21×25	5	19,5	1,95	0,3 ^{+0,2}	0,2
6×23×28	6	21,3	1,34	0,3 ^{+0,2}	0,2
6×26×32	6	23,4	1,65	0,4 ^{+0,2}	0,3
6×28×34	7	25,9	1,70	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×32×38	6	29,4	—	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×36×42	7	33,5	1,02	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×42×48	8	39,5	2,57	0,4 ^{+0,2}	0,3
8×46×54	9	42,7	—	0,5 ^{+0,3}	0,5
8×52×60	10	48,7	2,44	0,5 ^{+0,3}	0,5
8×56×65	10	52,2	2,50	0,5 ^{+0,3}	0,5
8×62×72	12	57,8	2,40	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×72×82	12	67,4	—	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×82×92	12	77,1	3,00	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×92×102	14	87,3	4,50	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×102×112	16	97,7	6,30	0,5 ^{+0,3}	0,5
10×112×125	18	106,3	4,40	0,5 ^{+0,3}	0,5

Таблица 6.8. Размеры эвольвентных шлицевых соединений, мм

D	Модуль зубьев											
	$m = 1$		$m = 1.5$		$m = 2$		$m = 2.5$		$m = 3$		$m = 5$	
	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>z</i>	<i>x</i>
12	11	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	14	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	18	0,5	12	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—
22	20	0,5	14	—0,25	—	—	—	—	—	—	—	—
25	24	0	16	—0,25	—	—	—	—	—	—	—	—
28	26	0,5	18	—0,25	12	1	—	—	—	—	—	—
30	28	0,5	18	0,75	14	0	—	—	—	—	—	—
32	30	0,5	20	0,25	14	1	—	—	—	—	—	—
35	34	0,5	22	0,25	16	—0,5	12	1,25	—	—	—	—
38	36	0,5	24	0,25	18	0	14	0,25	—	—	—	—
40	38	0,5	26	0,25	18	1,0	14	1,25	—	—	—	—
42	—	—	26	0,75	20	0	16	—0,25	—	—	—	—
45	—	—	28	0,75	22	—0,5	16	1,25	—	—	—	—
50	—	—	32	0,25	24	0	18	1,25	—	—	—	—
55	—	—	36	0,25	26	0,5	20	1,25	14	1,25	—	—
60	—	—	38	0,75	28	1	22	1,25	16	0,25	—	—
65	—	—	—	—	32	0,5	24	1,25	18	—0,75	—	—
70	—	—	—	—	34	0	26	1,25	18	1,75	12	2,5
75	—	—	—	—	36	0,5	28	1,25	20	0,75	14	0
80	—	—	—	—	38	1	30	1,25	22	—0,25	14	2,5
90	—	—	—	—	—	—	34	1,25	24	1,25	16	2,5
100	—	—	—	—	—	—	38	1,25	28	—0,75	18	2,5
110	—	—	—	—	—	—	42	1,25	30	0,75	20	2,5
120	—	—	—	—	—	—	46	1,23	34	—1,25	22	2,1

Приложение. *z* — число зубьев; *x* — смещение исходного контура рейки.

6.3

КОНСТРУКЦИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

В большинстве случаев в СММ используются подшипники качения. Подшипники, работающие в СММ, должны устанавливаться так, чтобы через них не проходил магнитный поток. Для этого корпуса подшипников или валы делают из немагнитной стали, а в ряде случаев используют подшипники из немагнитных сталей. На пути магнитного потока через подшипники должен быть немагнитный участок длиной примерно в 10 раз больше ближайшего рабочего зазора.

В СММ особенное значение имеет точное центрирование валов, так как зазоры между взаимодействующими элементами СММ невелики. Поэтому необходима тщательная проработка конструкции подшипниковых узлов [28, 43].

Валы устанавливаются в парных подшипниках. Для хорошей работы подшипников они должны быть установлены в одном корпусе. При этом один из подшипников фиксируется на валу и в корпусе, а второй закреплен или на валу или в корпусе с возможностью перемещения в осевом направлении относительно корпуса или вала. Возможность перемещения устраняет влияние тепловых деформаций на работу подшипников. Посадки плавающих обойм в корпусе должны быть свободными. Фиксацию наружной обоймы у плавающих подшипников делают редко, при этом следует термообрабатывать вал для получения повышенной твердости. Примеры установки радиальных подшипников показаны на рис. 6.8. Крепление подшипников на валу целесообразно осуществлять затяжкой внутренней обоймы гайкой, что точно фиксирует подшипник в осевом направлении и предотвращает проворот внутренней обоймы на валу. Часто затяжка производится через дополнительные детали или с помощью дистанционной втулки между подшипниками. Установка подшипника на вал с натягом до бурта, без затяжки или стопорения допустима лишь в слабонагруженных узлах. Схемы крепления подшипников на валу показаны на рис. 6.9. Схемы установки подшипников в корпусах показаны на рис. 6.10.

В тяжелонагруженных опорах наружную обойму затягивают гайками с упором на бурт или распорную втулку. Концевые подшипники фиксируются крышками. Широко используется фиксация пружинными кольцами. Для облегчения монтажа кольца устанавливают с зазором 0,1—0,2 мм. В корпусах из легких сплавов подшипники качения устанавливаются в переходных гильзах. Гильзы делают из углеродистой стали. Схемы установки подшипников с гильзами показаны на рис. 6.11. Гильзы следует фиксировать в осевом направлении и от проворачивания.

Шариковые радиально-упорные подшипники применяются с обязательной осевой затяжкой. Установка подшипников производится по одной из схем, приведенной на рис. 6.12. Осевой предварительный натяг создается осевой затяжкой на мерную величину смещения наружных обойм относительно внутренних, затяжкой до определенного момента трения на валу или созданием пружинного натяга. В первых двух случаях натяг можно создать одним из методов, показанных на рис. 6.13. Для создания пружинного натяга в подшипниковом узле устанавливаются спиральные или тарельчатые пружины, обеспечивающие постоянный натяг, выбирающий износ подшипников и тепловые деформации. Осевой пружинный натяг может быть использован для

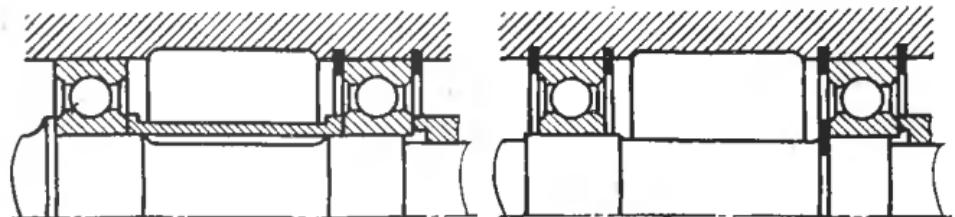


Рис. 6.8. Примеры парной установки радиальных подшипников

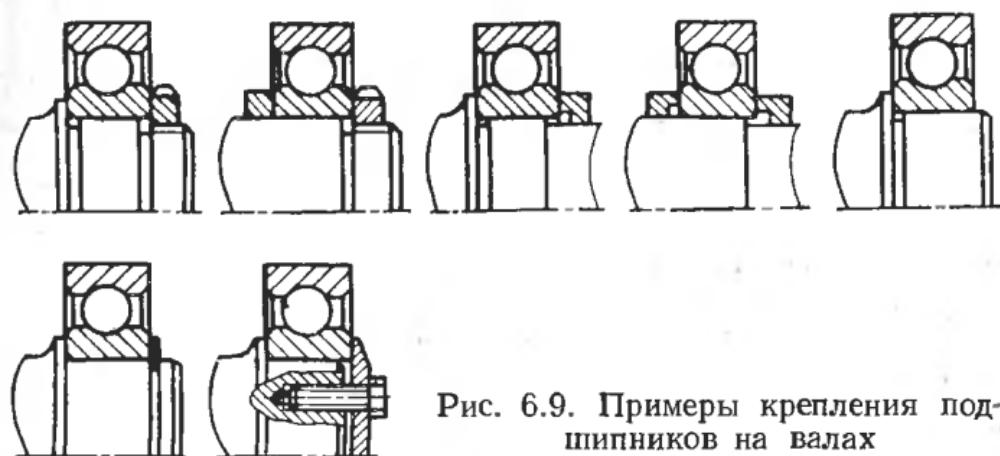


Рис. 6.9. Примеры крепления подшипников на валах

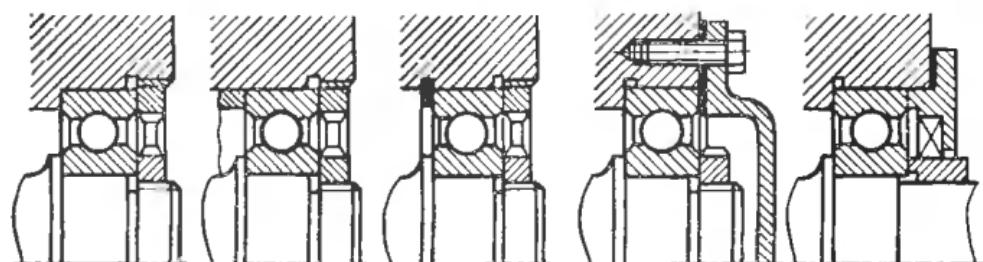


Рис. 6.10. Примеры крепления подшипников в корпусах

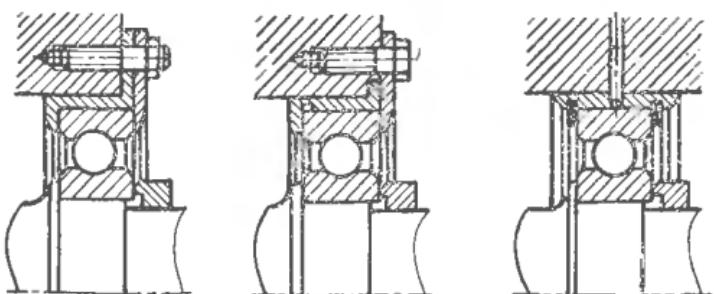


Рис. 6.11. Установка подшипников в гильзах

радиальных, радиально-упорных, конических роликовых и упорных шариковых подшипников. Некоторые схемы создания пружинного на-тяга показаны рис. 6.14.

Схемы установки конических роликовых подшипников аналогичны приведенным выше для радиально-упорных шариковых. Упорные шариковые подшипники применяются в СММ в случае действия значительных торцовых магнитных сил. Они используются, как правило, в сочетании с радиальными подшипниками. Обычно вал фиксируется в осевом направлении упорным подшипником. Внутренние обоймы радиальных подшипников закрепляются на валу, наружные делаются плавающими. Схемы установки подшипников показаны на рис. 6.15.

Подшипники, работающие в нормальных условиях при частоте вращения до 3000 об/мин, смазываются консистентными смазками. Данные некоторых марок смазок приведены в табл. 6.9 [19]. В специальных СММ при частоте вращения больше 3000 об/мин допустимая нагрузка подшипников должна быть значительно уменьшена и смазка должна осуществляться жидкими маслами, для чего механизм оборудуется циркуляционной смазочной системой. При температуре подшипникового узла менее 200° С применяются минеральные масла марок турбинное Л (22), УТ (30), Т (46), синтетическое БЗВ, трансформаторное, веретенное 20, индустриальное 12 и т. п. При более высоких температурах следует использовать фторуглеродные и полифенилэфирные смазки (до 300° С). Целесообразно водяное охлаждение подшипниковых узлов. При смазке жидкими маслами масло следует подавать строго дозированно в тонкораспыленном виде. Распыление производится сжатым воздухом при давлении до 10⁷ Па. При форсуночной подаче расход масла (л/мин) на один подшипник $V = a + 1,9 \cdot 10^{-6} dn$, где $a = 1$ при радиальной нагрузке менее 1000 Н, $a = 1,5$ — от 1000 до 1500 Н, $a = 2$ — от 5000 до 15 000 Н, $a = 2,5$ — более 15 000 Н; d — диаметр отверстия подшипника, мм; n — частота вращения, об/мин.

Пример струйной смазки приведен на рис. 6.16. Наиболее распространена смазка высокоскоростных подшипников масляным туманом. Расход масла (г/ч) при смазке масляным туманом на один подшипник $q = 0,4 + 0,02 d$, где d — диаметр отверстия подшипника, мм.

Подшипники, работающие в вакууме или на воздухе при температурах более высоких, смазываются твердыми смазками — соединениями молибдена (дисульфида молибдена), селенидами, теллуридами, фторидами кальция и бария, а также графитом. Смазка может осуществляться ротопринтным способом, продувкой порошка через подшипник или нанесением на рабочие поверхности подшипника слоя смазки толщиной 15—20 мкм. Промышленные твердые смазочные материалы ВНИИП-209, ВНИИП-213 используются при температуре от —60 до +350° С, в вакууме до 10⁻⁹ мм рт. ст.; ВНИИП-212 применяется при температуре от —60 до +250° С, а ВНИИП-230 — от —60 до +300° С. В качестве твердой смазки могут быть использованы также золото, йодид серебра, индий. В особых случаях допускается работа подшипников со специальными сепараторами на воздухе и в вакууме без смазки, однако ресурс таких подшипников мал. В табл. 6.10 приведены некоторые рекомендации по использованию подшипников без смазки.

Подшипниковые узлы с консистентной или жидкой смазкой должны быть оборудованы уплотнением, препятствующим вытеканию смазки

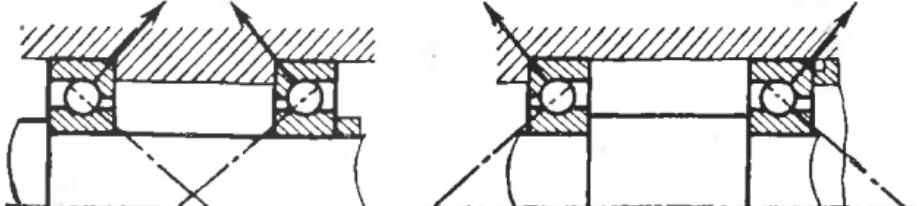


Рис. 6.12. Варианты установки радиально-упорных подшипников

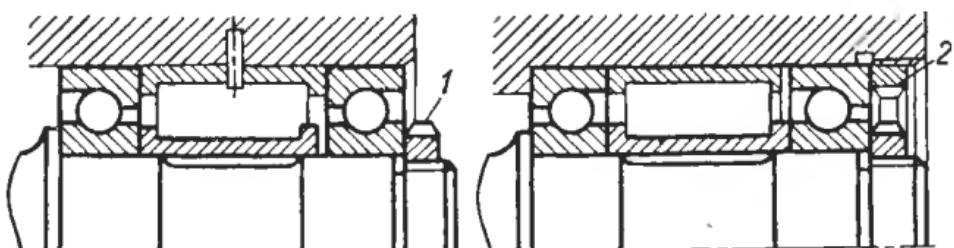


Рис. 6.13. Способы создания предварительного натяга при установке радиально-упорных подшипников:

1 и 2 — гайки

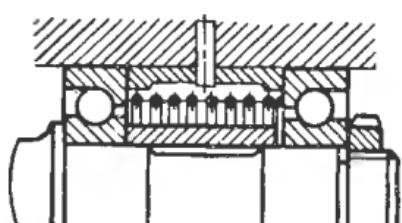
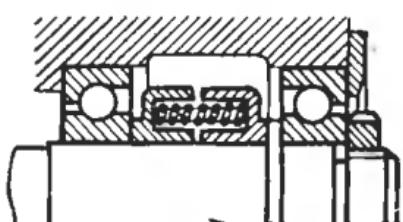
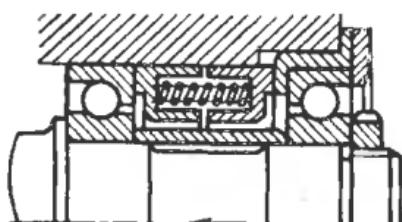


Рис. 6.14. Схемы пружинного предварительного натяга

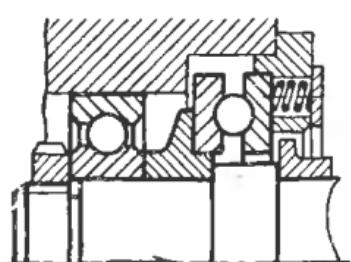
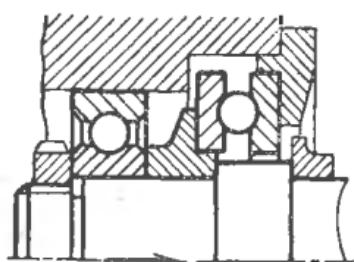


Рис. 6.15. Схемы установки упорных шариковых подшипников

Таблица 6.9. Консистентные смазки для подшипников

Марка	Состав	Применение	Рабочая температура, °C
1-13, УТВ ЦИАТИМ-203	Масло касторовое, нефтяные масла с натриевыми или кальциевыми соединениями Технический стеарин, трансформаторное масло с литиевым мылом, асидол, кашалотовый жир	Подшипник качения Подшипник качения с высокими нагрузками. Срок службы до 6000 ч	(-40)– (+90) (-40)– (+80)
ЦИАТИМ-221	Кальциевые масла и кремний-органические жидкости	Подшипники качения электромашин	(-40)– (+150)
ВНИИНП-242	Литиевое мыло, индустриальное масло, дисульфид молибдена 2%, ингибиторы	Подшипники при больших нагрузках, быстroredходные подшипники (до 3000 об/мин)	(-40)– (+110)
ВНИИНП-259	Литиевое мыло (12–14%), масло машинное СУ	То же	(-40)– (+120)
ВНИИНП-210	Кремнийорганическая жидкость, графит, дисульфид молибдена, стабилизатор	Подшипники качения с высокими нагрузками и средними скоростями	(-30)– (+400)
ВНИИНП-220	Кремнийорганическая жидкость, кальциевое мыло, дисульфид молибдена	Шариковые и роликовые нагруженные подшипники	(-60)– (+150)
ВНИИНП-257	Дизооктилсебацинат, стеарат-нитрит натрия, дисульфид молибдена, жидкость ФМ 1322/300	Малогабаритные подшипники (до 30 000 об/мин) в вакууме до 10^{-8} мм рт. ст.	(-50)– (+150)
ВНИИНП-270	То же жидкость ФМ-6	Подшипники со средними скоростями (до 2000 об/мин)	(-70)– (+150)

и загрязнению подшипника. Используются следующие типы уплотнений: сальниковые с набивкой, манжетные, лабиринтные и их сочетания. В сальниковых уплотнениях используется набивка из хлопчатой ткани, фетра, асбеста, фторопластика и т. п. Угол профиля канавки обычно 15° .

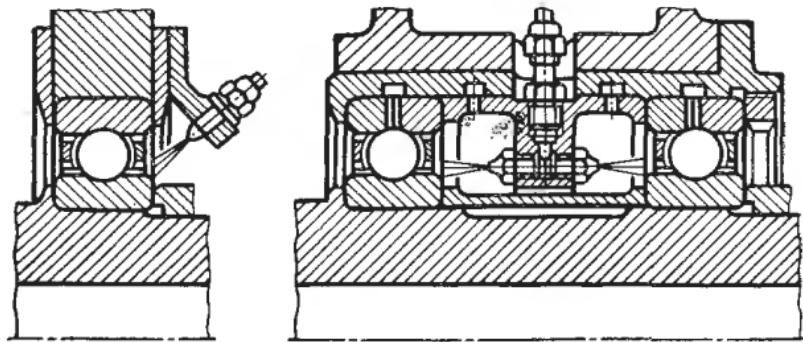


Рис. 6.16. Пример струйной смазки подшипников

Схемы сальников приведены на рис. 6.17. Манжетное уплотнение выполняется с полихлорвиниловыми или фторопластовыми манжетами. Первые работают при температуре до 80°C , вторые — до 300°C . Формы манжет и их установка показаны на рис. 6.18. Наиболее часто применяют резиновые армированные манжеты (рис. 6.19). Конструкции резиновых манжет приведены на рис. 6.20. Размеры даны в табл. 6.11 и 6.12. Лабиринтные уплотнения выполняются в виде кольцевых

Таблица 6.10. Рекомендации по применению радиальных и радиально-упорных подшипников при работе без смазки

Материал сепаратора	Предельная частота вращения, об/мин, при диаметре вала 25 мм		Предельно допустимые радиальные нагрузки, Н
	ресурсная	кратковременная	
Фторопласт-4	3000 —	8 500 3 000	$\sim 0,2$ от каталожной $\sim 0,1$ от каталожной
Фторопласт-40 с бронзой	8500 3000	16 000 8 500	
Маслянит	8500 3000	16 000 8 500	

Примечание. В числителе указаны данные для работы в атмосферных условиях: ресурсная работа в течение 500 ч, кратковременная — 200 ч; в знаменателе — данные для работы в вакууме до 1×10^{-6} мм рт. ст., ресурсная работа — более 100 ч, кратковременная — менее 100 ч.

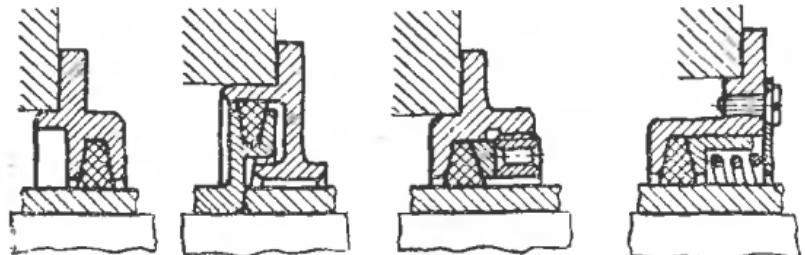


Рис. 6.17. Установка сальников

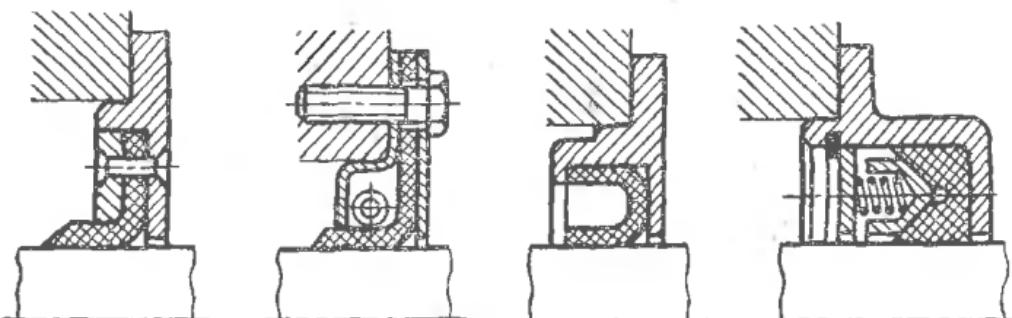


Рис. 6.18. Формы манжет и их установка

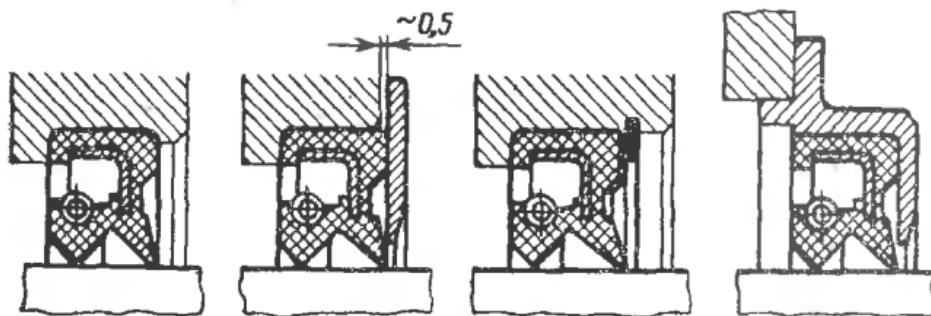


Рис. 6.19. Способы установки резиновых манжет

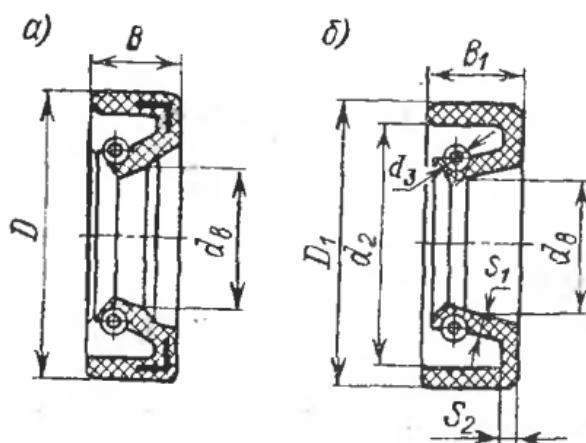


Рис. 6.20. Конструкции резиновых манжет

Таблица 6.11. Размеры сегментных резиновых армированных уплотнений с пружиной по ГОСТ 8752—70, мм (рис. 6. 20, а)

d_B	D	B	d_B	D	B
20	35; 38; 40	10	55	75; 80	10
22	40		58	80	
24	40		60	80; 85	
26	42; 45				
28	45; 50		65	90	12
30	50; 52; 55		70	95; 100	
32	50; 52; 55		75	110	
35	55; 58; 60		80	105; 110	
38	55; 58; 60		85	110	
40	60; 65		90	120	
42	65		95	120; 125	
45	65; 70		100	125; 130	
48	70		105	135	
50	70; 75; 80		110	135; 140	
52	75		115	145	

Таблица 6.12. Размеры манжетных резиновых неармированных уплотнений, мм (рис. 6.20, б)

d_B	D_1	B_1	d_2	S_1	S_2
20	40	10	35	1,5	3,5
22	45		40		
25					
28	50				
30			45		
32	52	12			
35	55		48		4
40			55		
45					
50	72		65		

щелей. На поверхности щелей может быть выполнена резьба или кольцевые канавки, размеры которых приведены в табл. 6.13, а схема дана на рис. 6.21 [26]. Зазоры в уплотнении с канавками принимаются 0,2—0,5 мм, с треугольной отгонной резьбой при угле наклона витков резьбы 10° и высоте до 0,7 мм — 0,05—0,06 мм. Внутри корпуса перед лабиринтом при жидкой смазке целесообразно установить на валу отражающие диски.

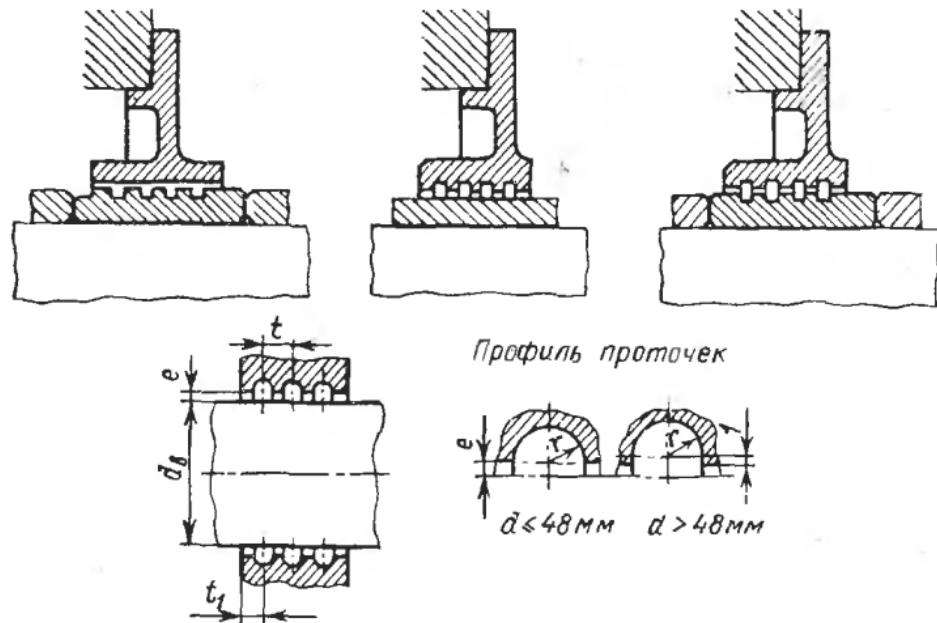


Рис. 6.21. Конструкции лабиринтных уплотнений

В некоторых случаях применения СММ для привода насосов, реакторов, вакуумных и других устройств ведомые валы работают в условиях, делающих целесообразным использование гидростатических или гидродинамических опор, а также подшипников скольжения для ведомых валов. Выбор материалов опор и их конструкции определяется в каждом конкретном случае условиями эксплуатации СММ.

Таблица 6.13. Размеры уплотнений с кольцевыми проточками, мм

d_B	e	t	t_1	r
10—50	0,2	4,5	3	1,5
50—80	0,3	4,5	3	1,5
80—110	0,4	6	4	2
110—180	0,5	7,5	5	2,5

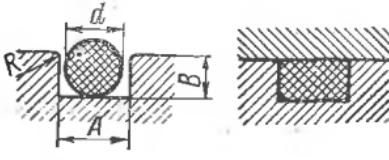
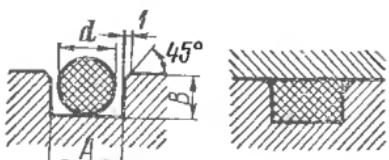
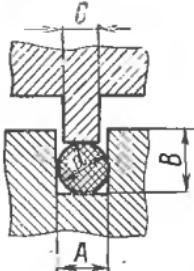
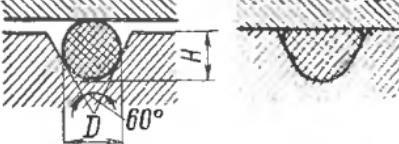
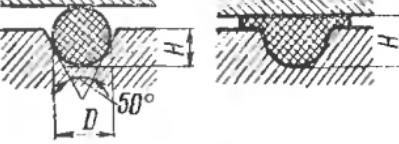
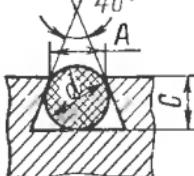
ФЛАНЦЫ И УПЛОТНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ СММ

Для герметизации установки СММ экранированного исполнения на вакуумные камеры применяются уплотнения с прокладками. Камеры и СММ в этом случае имеют фланцы, между которыми располагается прокладка, деформируемая силой сжатия фланцев. В качестве прокладок могут быть использованы резина, фторопласт, индий или медь. Характеристики уплотняющих прокладок приведены в табл. 6.14.

Т а б л и ц а 6.14. Характеристика уплотняющих прокладок

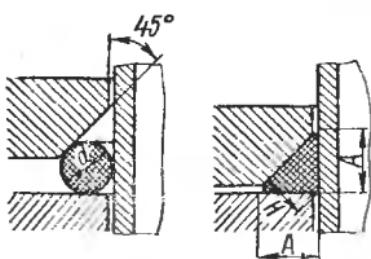
Материал прокладки	Допустимая температура, °С		Форма и размеры прокладок
	длительно	кратковременно	
Натуральный каучук Вакуумная резина Резина типа витон	(−30)−(+60) (−25)−(+85) 150	(−65)−(+75) (−50)−(+150) 260	Круглая (диаметр 3,5—6,5 мм) или плоская (толщина 3,5—10 мм)
Фторопласт	(−190)−(+280)	400	Плоская (толщина 2,5—8 мм)
Медь	450	600	Лист (толщина 0,5—1,6 мм) или проволока (диаметр 1,5—2,5 мм)
Индий	150	—	Проволока (диаметр 0,8—1,6 мм)
Алюминий	150—250	400	Лента (толщина 0,2—0,5 мм) или проволока (диаметр 1—2,2 мм)

Таблица 6.15. Конструкция уплотнений

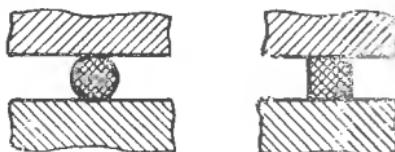
Конструкция	Соотношение размеров
	Канавочные уплотнения с круглыми прокладками из резины: $B/d = 0,72; A/d = 1,15; 0,15d \leq R \leq 0,22d$
	$B = 0,72d; C = 2E = (0,25 \div 0,32)d; A = d$
	$B = (0,70 \div 0,75)d; A/d = 1,2 \div 1,34$
	$A = d; B = (1,15 \div 1,20)d; C = (0,7 \div 0,8)d$
	$H = 0,8D$
	$H = 0,6D; H' = 0,8D$
	$A = 0,9d; C = (0,75 \div 0,8)d$

Конструкция

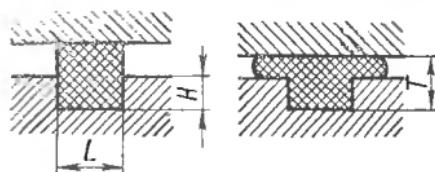
Соотношение размеров



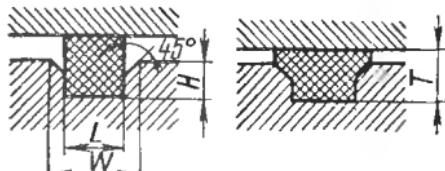
Конусные уплотнения с круглыми прокладками из резины:
 $A \approx 1,32d; H = 0,92d$



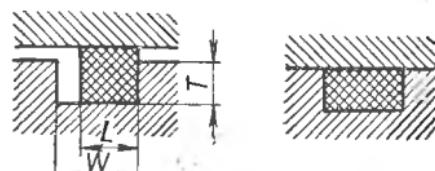
Уплотнение с гладкими фланцами с резиновой, фторопластовой или металлической прокладками



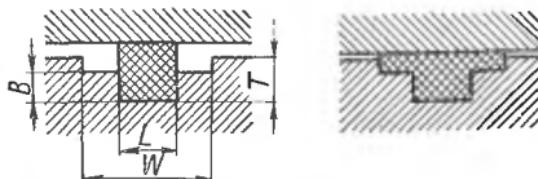
Канавочные уплотнения с плоскими прокладками из резины или фторопласта:
 $H = 0,5L; T = 0,8L$



$H = 0,6L; W = 1,5L;$
 $T = 0,8L$



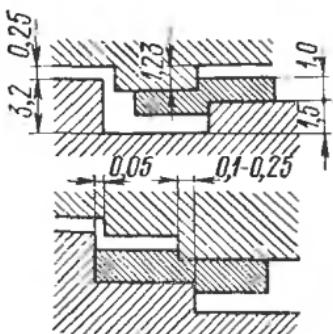
Резиновая прокладка
 $T = 0,75L; W = 1,4L$



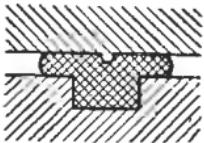
Резиновая прокладка
 $T = 0,75L; B = 0,5L;$
 $W = 2,2L$

Конструкция

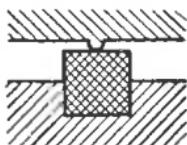
Соотношение размеров



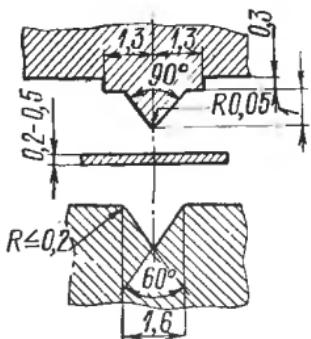
Уплотнение с медной прокладкой, работающей на срез



Гребешковые уплотнения с резиновой прокладкой



Гребешковые уплотнения с фторопластовой прокладкой



Уплотнение с тонкими металлическими прокладками

Уплотнения могут иметь различную конструкцию и обеспечивать ограниченное или неограниченное сжатие прокладки. В первом случае поверхности фланцев при затяжке соприкасаются, а прокладка в деформированном виде находится в канавке. Прокладка изготавливается из резины. Во втором случае поверхности фланцев не соприкасаются

Таблица 6.16. Размеры фланцев канавочного уплотнения, мм, по рис. 6.22

D_y	D	D_6	d	Число отверстий	d_0	b	f	d_1	d_2
25	90	70	11	4	45	8	1	58	30
40	105	85			60	10		72	45
50	120	100			75			88	60
70	145	120	13	8	90			105	80
80	160	135			105	12	2	120	90
100	185	160			125			145	110
130	210	185			155			170	140
160	235	210			180			195	170
200	300	270	16		233	16		252	220
260	350	320		12	283			302	270
300	400	370			333			352	320
350	450	420			388	20		402	370
400	520	480	18		438			458	420
450	575	535		16	492			511	470
500	625	585			542	22		561	520

и прокладка находится между ними. Эти уплотнения используются при металлических прокладках или фторопласте. Схемы уплотнений приведены в табл. 6.15 [35].

Конструкции фланцев различного вида показаны на рис. 6.22—6.23, размеры их даны в табл. 6.16—6.17. В табл. 6.18 приведены размеры шпилек и уплотняющей медной прокладки толщиной 0,5 мм для фланцев по рис. 6.23. Фланцы привариваются к корпусам с помощью аргонодуговой сварки. Шов должен быть вакуумноизолированным.

Таблица 6.17. Размеры фланцев канавочно-клинового

Тип фланца	D_y	D	D_6	d	Число отверстий	Фланец с канавкой									
						d_0	b	b_1	b_2	d_1	d_2	d_3	d_4	c	f_1
	мм														
I	25	85	62	11	4	30	17	12	6	35	80	30	39	3	—
	28	88	65			35				40	82	33	42		
	30	90	68			35				40	85	35	45		
	32	92	70			40				45	98	37	47		
	38	105	78	13	8	45	19	14		50	100	43	51		
	40	110	80			45				50	105	46	53		
	45	115	85			50			7	55	110	51	58	4	
	50	120	90			55				60	115	56	63		
	55	125	95			60	20	15		65	120	61	68		
	60	130	100			65				70	125	66	73		
	65	135	105			70				75	130	71	78		
II	70	165	118	14	12	95	18	16	6	100	76	90	152	5	7
	75	170	122			100				105	82	95	158		
	80	175	128			105				110	86	100	164		
	85	180	132			110				115	92	105	168		
	100	200	148			125				130	106	120	188		
	125	225	175	16	16	150	20	18		155	132	145	214		9
	150	265	200			175				180	156	170	252		
	160	280	215			190	21	19		195	168	184	268	10	
	175	290	225			200				205	182	195	278		
	200	320	255			230				235	208	224	308		
	225	355	280			250				260	232	245	342		
III	250	410	332	18	28	300	19	6	—	310	294	398	258	5	10
	260	420	342			310				320	304	408	268		
	275	440	358			325				335	318	428	282		
	300	475	382			350				360	344	462	308		
	325	500	408		36	375	21	7		385	368	488	332	6	11
	350	525	432			400				410	394	512	358		
	375	555	458			425				435	420	542	382		
	400	580	488			455	23			465	448	568	408		13
	450	625	532			500				510	494	612	458		
	500	680	588			555				565	548	668	508		

уплотнения с медиой прокладкой по рис. 6.23

				Фланец с зубом												
<i>r</i>	<i>d₅</i>	<i>d₆</i>	<i>d₇</i>	<i>f₂</i>	<i>b</i>	<i>b₁</i>	<i>b₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₃</i>	<i>d₄</i>	<i>f₁</i>	<i>d₅</i>	<i>d₆</i>	<i>d₇</i>	<i>f₂</i>
мм																
—	—	—	—	—	26	21	6	35	80	30	39	—	—	—	—	—
								40	82	33	42					
								40	85	35	45					
								45	98	37	47					
								50	100	43	51					
								50	105	46	53					
					27	22	7	55	110	51	58					
								60	115	56	63					
								65	120	61	68					
								70	125	66	73					
								75	130	71	78					
—	—	—	—	—	18	16	7	100	76	90	155	11	—	—	—	—
								105	82	95	160					
								110	86	100	165					
								115	92	105	170					
								130	106	120	190					
					20	18		155	132	145	215	12				
								180	156	170	255					
					21	19		195	168	184	270	13				
								205	182	195	280					
								235	208	224	308					
								260	232	245	342					
272	280	295		11	19	7	—	310	294	400	258	11	272	280	295	13
282	290	305						320	304	410	268		282	290	305	
296	304	320						335	318	430	282		296	304	320	
322	330	345						360	344	465	308		322	330	345	
346	354	370		13	21	8		385	368	490	332	13	346	354	370	15
372	380	395						410	394	515	358		372	380	395	
398	406	420						435	420	545	382		398	406	420	
424	432	450		15	23			465	448	570	408	15	424	432	450	17
472	480	495						510	494	615	458		472	480	495	
524	532	550						565	548	670	508		524	532	550	

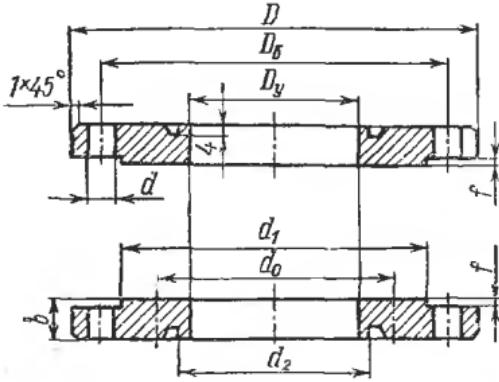


Рис. 6.22. Фланцы канавочного уплотнения: d_0 — средний диаметр уплотняющей прокладки; D_b — диаметр окружности болтовых отверстий; D_y — диаметр отверстия фланца

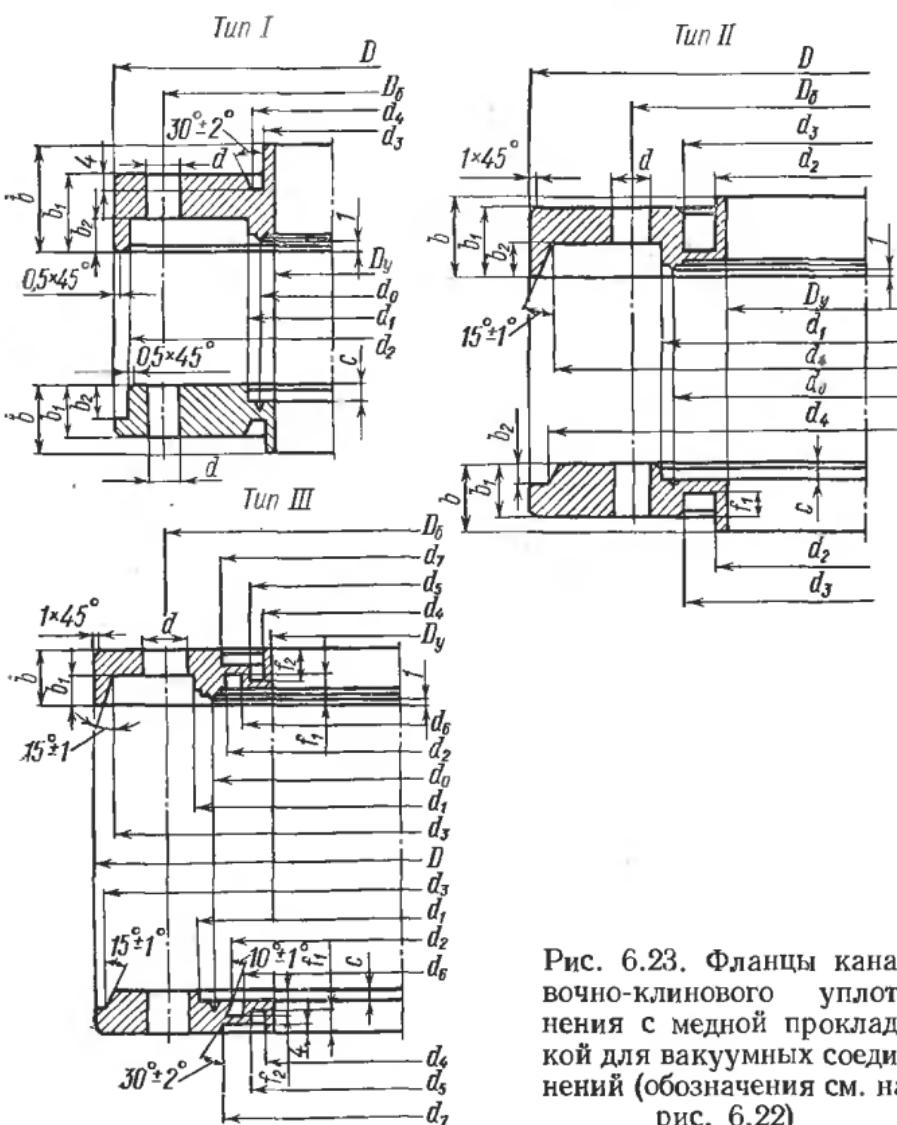


Рис. 6.23. Фланцы канавочно-клинового уплотнения с медной прокладкой для вакуумных соединений (обозначения см. на рис. 6.22)

**Т а б л и ца 6.18. Размеры шпилек
и уплотняющих медных прокладок
толщиной 0,5 мм для фланцев по рис. 6.23, мм**

Диаметр проходного отверстия фланца D_y	Размеры шпилек				Диаметры прокладки	
	Диаметр резьбы	Шаг резьбы	Длина шпильки	Длина нарезанной части	наружный	внутренний
25	10	1,0	55	15	35	25
28					40	30
30					40	30
32					45	35
38	12	1,25	60	17	50	40
40					50	40
45					55	45
50					60	50
55			62		65	55
60					70	60
65					75	65
70			68	18	100	80
75					105	85
80					110	90
85					115	100
100					130	115
125	14	1,5	65	20	155	130
150					180	155
160			67		195	180
175					205	185
200					235	215
225					260	240
250	16		72	22	310	285
260					320	295
275					335	310
300					360	335
325			75		385	360
350					410	380
375					435	405
400			80		465	435
450					510	480
500					565	535

ФЛАНЦЫ И УПЛОТНЕНИЯ СММ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В экранированных СММ, работающих при перепадах давления снаружи и внутри экрана, фланец экрана целесообразно выполнять в соответствии с требованиями ГОСТ 12831—67.

Конструкции фланцев показаны на рис. 3.15, *a*, *b*, а их размеры приведены в табл. 6.19.

Диаметр центрального отверстия во фланце принимается по диаметру внутренней полумуфты с учетом конструктивного зазора между экраном и полумуфтой.

Для уменьшения размеров фланца следует при расчетах определять наибольший допустимый диаметр полумуфты. Если диаметральные размеры полумуфты, определенные по передаваемому моменту, велики, следует секционировать муфту, т. е. на один вал устанавливать несколько одинаковых муфт.

У фланца, показанного на рис. 3.15, *a*, поверхность D_2 может быть выполнена цилиндрической длястыковки с фланцем, изображенным на рис. 3.15, *б*. Фланцы, рассчитанные на давление 0,1—2,5 МПа, работоспособны при температурах до 450°C , а рассчитанные на давление 4—20 МПа — до 530°C . Они могут быть приварены к тонкостенной части экрана или могут быть выполнены заодно с ней. Уплотняющие плоские прокладки могут быть изготовлены из паронита, фторопласта или резины. Они работают при неограниченном сжатии.

Материалы фланцевого соединения приведены в табл. 6.20. Допустима замена материалов фланцевого соединения металлами или сплавами с прочностью при рабочей температуре не менее, чем у металлов, указанных в табл. 6.19.

Механические свойства материалов фланцевого соединения приведены в табл. 6.21.

Таблица 6.19. Размеры фланцев, мм

$D_{\text{и}}$	D_1	D	S_0	S_1	t	Конструкция фланцев						d	Число болтов	Диаметр резьбы болтов или шпилек				
						по рис. 3.15, а			по рис. 3.15, б									
						D_2	h	Толщина	D_2	h	Толщина							
$p = 0,1 \div 0,25 \text{ МПа}$																		
130	100	38	4,0	10,5		69			70									
140	110	49	4,5			80		13	81									
160	130	66	5,5	11,0		100		9	101									
185	150	78	6,0	12,0		115			116									
205	170	96		13,0		137			138									
235	200	121				166			167									
260	225	146	7,5		13,5	191			192									
315	280	202	10,0	16,5		249	17	13	250	13	16							
370	335	254	12,0	17,0		303	20		304		19							
235	395	303	13,5	18,5		356			357									
485	445	351	15,5	19,5		406		21	407		16							
535	495	398				456			457									
640	600	501			17,0	21,0												
755	705	602				22,0	31	561	24	562								
975	920	792				24,0	36	661	25	662								
						26,0	41	867		868								

Продолжение табл. 6.19

D_H	D_1	D	S_0	S_1	t	Конструкция фланцев						d	Число болтов	Диаметр резьбы болтов или шпилек				
						по рис. 3.15, а			по рис. 3.15, б									
						D_2	h	Толщина	D_2	h	Толщина							
$p = 0,6 \text{ МПа}$																		
130	100	38	4,0	10,5		69			70									
140	110	49	4,5			80			81									
160	130	66	5,5	11,0		100			101									
185	150	78	6,0	12,0	23	115			116									
205	170	96				137			138									
235	200	121				166			167									
260	225	146	7,5	13,5	24	191			192									
315	280	202	10,0	16,5	33	249	21	17	250	17	20							
370	335	254	12,0	17,0		303	22		304									
435	395	303	13,5	18,5		356			357									
485	445	351	15,5	19,5		406			407									
535	495	398				23			18									
640	600	501				456			22									
755	705	602				561	24		23									
975	920	792				24,0	36	661	25	19	662	24	27	20	24	24		
						26,0	41	867			868	30	24	27	24	27		

$p = 1,0 \text{ МПа}$

145	110	38	4,0	12,0	29	75	17	13	76	13	16			
160	125	49	4,5		29	75	17	13	76	13	16			
180	145	66	5,5		30	109	19	15	110	15	18			
195	160	78	6,0	14,0	31	120			121					
215	180	96		16,0	32	149	21	17	150	17	20			
245	210	121		17,0		175			176					
280	240	146	7,5	17,5	38	203	23	19	204	19	22			
335	295	202	10,0	18,0	39	259			260					
390	350	254	12,0	19,0		312	25	21	313	21	24			
440	400	303	13,5	21,5		363			364					
500	460	351	15,5	23,5		421	27	22	422	22	26			
565	515	398		24		473			474					
670	620	501		17,0		24,5	41	575	29	24	576	24	28	
780	725	602						677	30		678		29	30
1010	950	792				29	48	877	33	27	878	27	32	33

$p = 1,6 \text{ МПа}$

145	110	38	4,0	13,0	29	75	17	13	76	10	13			
160	125	49	4,5	13,5	32	87			88					
180	145	66	5,5	14,0	32	109	19	15	110	15	18			

Продолжение табл. 6.19

D_H	D_1	D	S_0	S_1	t	Конструкция фланцев						d	Число болтов	Диаметр резьбы болтов и шпилек				
						по рис. 3.15, а			по рис. 3.15, б									
						D_2	h	Толщина	D_2	h	Толщина							
195	160	78	6,0	16,0		33	120	21	17	121	15	20		4				
215	180	96		7,0	17,0		149			150			18		16			
245	210	121					175	23	19	176	19	22		8				
280	240	146	7,5	17,5		38	203			204								
335	295	202	10,0		19	39	259	25	21	260	21	24	23		20			
405	355	254	12,0				312	27	23	313	23	26		12				
460	410	303	13,5	21,5		42	363	29	24	364	24	28		27	24			
520	470	351	15,5	24,5			421	33	28	422	28	32						
580	525	398					26,0	43	473	37	32	474	32	36	16	27		
710	650	501						49	575	43	38	576	38	42	33	30		
840	770	602			17,0		29,0	50	677	47	41	678	41	46		20		
910	840	692						52	777	49	43	778	43	48	40	36		
1020	950	792						877	51	45	878	50			24			
$p = 2,5 \text{ МПа}$																		
145	110	38	4,0	13,0		28	75	20	16	76	16	19						
160	125	49	4,5	13,5			87	21	17	88	17	20	18	4	16			

180	145	66	5,0	15,0	31	109	23	19	110	19	22	
195	160	78	6,0	16,0	33	120			121			
230	190	96	7,0	18,0	37	149	25	21	150	21	24	8
270	220	121		19,5	42	175	27	23	176	23	26	
300	250	146	7,5	20,0	43	203	29	25	204	25	28	27
360	310	202	10,0	21,5		259	31	27	260	27	30	
425	370	254	12,0	23,0	48	312	33	29	313	29	32	12
485	430	303	13,5	25,5	49	363	37	32	364	32	36	
550	490	351	15,5	27,5	50	421	41	36	422	36	40	30
610	550	398	17,0	33,0	56	473	45	40	474	40	44	
730	660	500	17,5	35,0	60	575	49	44	576	44	48	20
840	770	600	18,0		66	677	55	49	678	49	54	36

$p = 4,0 \text{ MPa}$

145	110	38	4,0	13	28	75	20	16	76	16	19	
160	125	48	5,0	14	29	87	21	17	88	17	20	4
180	145	66	5,5	15	31	109	23	19	110	19	22	
195	160	78	6,0	17	34	120	25	21	121	21	24	18
230	190	96	7,0	20	40	149	27	23	150	23	26	8
270	220	120	7,5	21	41	175	29	25	176	25	28	
300	250	145	8,0		42	203	31	27	204	27	30	24
375	320	200	11,0	25	50	259	39	35	260	35	38	12
445	385	252	13,0	29	59	312	43	39	313	39	42	30

D_H	D_1	D	S_0	S_1	t	Конструкция фланцев						d	Число болтов	Диаметр резьбы болтов или шпилек				
						по рис. 3.15, а			по рис. 3.15, б									
						D_2	h	Толщина	D_2	h	Толщина							
510	450	301	14,5	33,5	68	363	47	42	364	42	46	33	16	30				
570	510	351	15,5		70	421	53	48	422	48	52							
655	585	398	17,0	41	77	473	59	54	474	54	58	40		36				
755	670	495	20,0	42,5	81	575	63	58	576	58	61	46	20	42				
$p = 6,4 \text{ МПа}$																		
165	125	37	4,5	18,5	44	75	25	21	76	21	24	23	4	20				
175	135	47	5,5	19,5		87	27	23	88	23	26							
200	160	64	6,5	21,0	45	109	29	25	110	25	28							
210	170	77		21,5	47	120	31	27	121	27	30							
250	200	94	8,0	23,0	48	149	33	29	150	29	32	27	8	24				
295	240	118	8,5	27,0	62	175	37	33	176	33	36	30						
340	280	142	9,5	32,0	69	203	39	35	204	35	38	33	30					
405	345	198	12,0	-33,0	70	259	45	41	260	41	44							
470	400	246	16,0	35,0		312	49	45	313	45	48							
530	460	294	18,0	38,0		363	55	50	364	50	54	40	16	36				

595	525	342	20,0	44,0	84	421	61	56	422	56	60			
670	585	386	23,0	49,0	93	473	67	62	474	62	66	46		42
$p = 10,0 \text{ МПа}$														
165	125	37	4,5	19,5	43	75	27	23	76	23	26	23		20
195	145	45	6,5	20,5	44	87	29	25	88	25	28		4	
220	170	62	7,5	24,0	51	109	33	29	110	29	32		24	
230	180	75		24,5	56	120	35	31	121	31	34			
265	210	92	9,0	27,0	62	149	39	35	150	35	38	30		8
310	250	112	11,5	34,0	73	175	43	39	176	39	42		27	
350	290	136	12,5	39,0	82	203	47	43	204	43	46		30	
430	360	190	16,0	43,0	89	259	55	51	260	51	54		12	
500	430	236	21,0	52,0	103	312	61	57	313	57	60	49		36
585	500	284	23,0	58,0	104	363	71	66	364	66	70	46		42
655	560	332	25,0	64,0	123	421	77	72	422	72	76	52		16
715	620	376	28,0	67,0	124	473	81	76	474	76	80	52		48
$p = 16,0 \text{ МПа}$														
165	125	37	4,5	19,5	47	75	29	25	76	25	28	23	4	20
195	145	45	6,5	20,5	48	87	31	27	88	27	30			
220	170	62	7,5	24,0	54	109	35	31	110	31	34		27	24
230	180	75		24,5	57	120	37	33	121	33	36		8	
265	210	92	9,0	27,0	63	149	41	37	150	37	40	30		27

D_H	D_1	D	S_0	S_1	l	Конструкция фланцев						d	Число болтов	Диаметр резьбы болтов или шпилек				
						по рис. 3.15, а			по рис. 3.15, б									
						D_2	h	Толщина	D_2	h	Толщина							
310	250	112	11,5	34,0	68	175	45	41	176	41	44	33	8	—	30			
350	290	136	12,5	39,0	83	203	51	47	204	47	50	—	—	—	—			
430	360	190	16,0	43,0	88	259	61	57	260	57	60	40	12	—	36			
500	430	236	21,0	52,0	100	312	69	65	313	65	68	—	—	—	—			
585	500	284	23,0	58,0	111	363	79	74	364	74	78	46	16	—	42			
$p = 20,0 \text{ МПа}$																		
170	124	36	6,5	19,0	41	55	36	31	56	30	34	27	4	—	24			
210	160	46	7,5	29,5	58	69	42	37	70	36	40	—	—	—	—			
260	203	68	11,0	35,0	73	96	50	45	97	44	48	30	8	27	—			
290	230	80	15,0	41,0	81	115	56	51	116	50	54	33	—	30	—			
360	292	102	16,5	52,0	102	137	69	63	138	61	66	40	—	36	—			
385	318	130	20,0	53,0	111	169	79	73	170	71	76	—	—	—	—			
440	360	150	23,0	58,0	112	189	85	79	190	77	82	46	12	42	—			
535	440	192	28,0	74,0	193	244	95	89	245	87	92	52	—	48	—			

Таблица 6.20. Материалы фланцевого соединения

Найменование деталей	Давление p , МПа	Марка стали при температуре среды, °С				
		до 300	до 350	до 425	до 450	до 530
Фланцы	0,1—2,5	X18H9T; X18H12T; BCT3sp	X18H9; 0X18H10T; X18H10T; 20; 25	—	—	—
	4,0—20,0	X18H9; 0X18H10T; X18H10T; 20; 25	—	40X4Г18; 15XM; 15XMA	—	—
Болты или шпильки	0,1—2,5	20; 25	—	25; 35	30XMA	—
Шпильки	4,0; 6,4; 10,0	—	35	—	30XMA	25Х1МФ
	16,0; 20,0	35	—	35Х	—	—
Гайки	0,1—2,5	10; 20	—	20; 25	—	—
	4,0; 6,4; 10,0	—	25	—	30XMA	—
	16,0; 20,0	25	—	35	35Х	—
Шайбы	4,0—20,0	—	10; 20	—	—	15XM

Таблица 6.21. Механические свойства материалов фланцевого соединения

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа
Ст3сп	200	400	25Х1МФ	900	1000
10	210	340	X18H9	250	540
20	220	440	0X18H10T	270	520
25	260	440	X18H10T	240	540
35	310	520	X18H9T	220	500
15XM; 15XMA	300	550	X18H12T	220	540
35Х; 30XMA	750	950	40X4Г18	490	680

ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Подшипники скольжения используются в СММ в тех случаях, когда по условиям работы не могут быть применены подшипники качения (среды, не допускающие присутствия смазок, вакуум, высокие температуры и т. д.). Широкое распространение для изготовления подшипников скольжения получили антифрикционные спеченные и углеродные материалы.

В табл. 6.22 приведены параметры и условия применения антифрикционных спеченных материалов. Спеченные материалы работают в условиях ограниченной подачи смазки или с самосмазыванием за счет пропитки материала смазкой; антифрикционных присадок или твердых смазок, введенных в состав материала. Это позволяет использовать материалы при повышенных нагрузках, скоростях скольжения и температурах, а также в вакууме и агрессивных средах. Подшипники работают в паре с закаленными или незакаленными, но упрочненными валами. Твердость вала должна быть $HRC\ 55-60$. Конструкция подшипника должна обеспечивать осевую фиксацию вала. Материалы на основе железа предназначены для работы со смазкой в нейтральных средах, на основе меди — при повышенной влажности. Материалы на основе высоколегированных сплавов железа, железографитов, нержавеющих сталей и т. п. работают в экстремальных условиях (в вакууме, агрессивных средах, при высоких и криогенных температурах, без смазки).

В табл. 6.23 приведены параметры и условия применения антифрикционных углеродных материалов. Эти материалы химически стойки во многих агрессивных газовых и жидких средах (почти во всех кислотах, растворах солей, органических растворителях, ограниченно стойки в концентрированных растворах едких щелочей). При работе в газах их работоспособность зависит от состава и влажности газовой среды. Наличие влаги значительно уменьшает износ и снижает коэффициент трения.

Таблица 6.22. Параметры и условия применения антифрикционных спеченных материалов

Параметр	Марка					
	ЖК	ЖГр1	ЖГр2	ЖГр (0,8—1,5) Д(2,5—3)	БрО(8—10) Гр(2—4)	ЖГр3Цс ⁴
Плотность ρ , г/см ³	7,8			5,8—6,3		5,9—6,8
Пористость, %	15—25		17—25		15—25	10—20
Предел прочности σ , Н/мм ² :						
при растяжении	120	100	100	150	50	106
при сжатии	300	400	400	450	300	800
при изгибе	150	140	110	250	—	160
Твердость HB , Н/мм ²	400—700	450—1000	450	600—1200	400—500	600—1500
Коэффициент линейного расширения $\alpha \times 10^6$, ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹ , в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$:	$50—200$			$9—10,2$		$9—11$
$50—600$	—		—		12—14,5	13,4

Параметр	Марка							
	Ж	ЖГр1	ЖГр2	ЖГР(0,8—1,5) Д(2,5—3)	БрО(8—10) Гр(2—4)	ЖГр3Ц _С ⁴	ЖГр3М15	
Коэффициент трения <i>k</i> :								
при смазке	0,01—0,1	0,06—0,1	0,01—0,06	0,05—0,1	0,05—0,1	0,02—0,1	0,04—0,1	
без смазки		—				0,09—0,3	0,06—0,25	
Допустимая нагрузка <i>p</i> , Н/см ²	100—200	200—1000	500—800	300—400	2000	10—30	1000—2000	10—40
Допустимая скорость скольжения <i>v</i> , м/с	1—2	2—5	4	1—2	5—10	95	3—5	100
Допустимая рабочая температура <i>t_p</i> , °С	100	150	200	60—80	200		400	
Среда (работа со смазкой или без смазки)	Нейтральная среда, воздух (со смазкой — длительная, без смазки — кратковременная)				Воздух (с ограниченной смазкой или без смазки)	Воздух повышенной влажности (при ограниченной смазке или без смазки)		
Организация-разработчик	ЦНИИТмаш, ИПМ АН УССР, ОКТБ ИПМ АН УССР, НИИТАвторпром				ИПМ АН УССР, ОКТБ ИПМ АН УССР			

Параметр	Марка						
	ЖМ15CaFe ₂ 6	ЖНБМ	МГ30ЖНК	Х23Н18КБ; Х20КБ; Х18Н15КБ	Х23Н18МЦ	НАМИ-ГС-ТАФ	БрОЦ6-6ФТ
Плотность ρ , г/см ³	—	—	5,6—6,2	6—6,5	6,5—7,0	3,0	—
Пористость, %	6—10	15—22	8—15	10—20	5—10	—	30—35
Предел прочности σ , Н/мм ² :	при растяжении	—	120	60—70	—	—	—
при сжатии							
при изгибе	1000—1100	1100	250—270	910—950	950—1030	100—120	300
Твердость HB , Н/мм ²	1600—1800	850—950	400—800	$HRC\ 500—800$	$HRC\ 600—980$	—	250—400

Параметр	Марка						
	ЖМ15СаFe ₂ 6	ЖНБМ	МГ3ЖН1К	Х23Н18КВ; Х20КБ; Х18Н15КБ	Х23Н18М _С Ц	НАМИ-ГС-ТАФ	БрОЦ6-6ФТ
Коэффициент линейного расширения $\alpha \times 10^6$, ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$, в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$:							
50—200	—	—	120	11,3—13,2	9,4—14,4	—	—
50—600	—	—	—	10,0—16,1	11,6—16,4	—	—
Коэффициент трения k : при смазке	—	—	0,03—0,27 (вода)	0,3—0,2 (вода)	—	0,08—0,1 (вода)	—
без смазки	0,1	0,1—0,3	0,3	0,13—0,40	0,15—0,26	—	0,1
Допустимая нагрузка p , Н/см 2	250	1000	500	1800	10—30	300—500	10—30
Допустимая скорость скольжения v , м/с	5	1	60	1,5	50	1,5	60
Допустимая рабочая температура t_p , $^{\circ}\text{C}$	650	400	(—80)— (+500)	250	600	600	150 (—250) (+200)

Параметр	Марка						
	ЖМ15СаFe ₂ 6	ЖНБМ	МГЗЖН1К	Х23Н18КБ; Х20КБ; Х18Н15КБ	Х23Н18М _c Ц	НАМИ-ГС-ТАФ	БРОЦ6-6ФТ
Среда (работа со смазкой или без смазки)	Жидкие или парообразные щелочные металлы	Воздух (без смазки)	Агрессивные жидкие или газообразные среды, вакуум (без смазки)	Вода, несмазывающие жидкости, агрессивная среда	Вода, агрессивные жидкости и газы	Пресная и морская вода, агрессивные среды	
Организация-разработчик		ИПМ АН УССР, ОКТБ	ИПМ АН УССР		ИПМ АН УССР	НАМИ	НИИТА-вторпром; Имаш АН ССР; ИПМ АН УССР

П р и м е ч а н и я: 1. В марках материалов буквы обозначают: Ж — железо, Гр — графит, Д — медь, Бр — бронза, О — олово, Н — никель, Са — кальций, Х — хром, М — молибден, К — сера и сульфидирование, Ц_c — сернистый цинк, М_c — сернистый молибден, Б — бор и борирование, Ц — цементирование, МГ — металлографит, ФТ — фторопласт, цифры — процентное содержание элементов. 2. Данные материалов приведены по справочнику «Свойства порошков, металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов», Киев, «Наукова думка», 1978.

Таблица 6.23. Параметры и условия применения
антифрикционных углеродных материалов

Параметр	Марка						
	АО-1500	АО-600	АГ-1500	АГ-600	АО-1500-СО5	АО-1500-Б83	АГ-1500-СО5
Плотность ρ , г/см ³	1,65—1,70	1,60—1,65	1,70—1,80	1,65—1,75	2,70—3,00	2,60—2,90	2,50—3,10
Предел прочности σ , Н/мм ² :							
при сжатии	150—180	110—150	80—100	60—80	260—280	250—270	150—160
при изгибе	60—80	50—70	40—50	35—40	100—120	90—100	60—75
Твердость по Шору	60—65	55—60	45—50	43—45	70—75		65—70
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $(^{\circ}\text{C})^{-1}$, при 20—100° С		5,6			6,5—8,5	6,5	6,5—8,5

Продолжение табл. 5.23

Параметр	Марка							
	АГ-1500-Б83	АГ-1500-БрС30	7В-2А	АФГМ	АФг.80ВС	АМС-1	АМС-3	АМС-5
Плотность ρ , г/см ³	2,40— 2,80	2,30— 2,50	1,90— 2,00	2,15— 2,30	2,05— 2,15	1,74—1,77	1,76— 1,80	1,40—1,45
Предел прочности σ , Н/мм ² :								
при сжатии	140—150	150—160	35—58	8—16	10—19	190—220	90—120	180—200
при изгибе	50—60	60—70	20—30	10—15	—	50—70	30—40	180—210
Твердость по Шору	70—72	70—75	38—40	30—35	20—25	600—700 *	500—600 *	
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $(^{\circ}\text{C})^{-1}$, при $20—100^{\circ}\text{C}$	6,5	6,0	18,0— 25,0	40—70	80—130	30—50	20—40	40—60
Допустимая рабочая температура t_p , $^{\circ}\text{C}$:								
в окислительной среде	230	400—450	250	180	200	—	—	—
в нейтральной среде	230	900	250	200		(—200)÷(+200)		

Параметр	Марка							
	АГ-1500-Б83	АГ-1500-БрС30	7В-2А	АФГМ	АФГ-80ВС	АМС-1	АМС-3	АМС-5
Допустимая нагрузка p , Н/см ²	150—200	150—200	100—150	150—200	100—150	1000		2000
Допустимая скорость скольжения v , м/с	20				5			4
Коэффициент трения k			0,05—0,10			0,05—0,2	0,08—0,25	0,08—0,2
Среда	Жидкие и газообразные среды	Осущен- ные ней-траль- ные газы	Актив- ные и от-носитель-но влажные ней-траль- ные газы	Влажные газы (сухое трение), нефтепро-дукты (жид-костное трение)	Вода, воздух		Нейтраль- ные среды (работа без смазки), жидкостные среды	
Материал вала	Сталь, хромовое покрытие			Сталь (HRC 40—50)	Бронза, нержа- веющие стали		Сталь	

* Твердость дана по NB , Н/см²

Для работы в условиях трения без смазки используются металлофторопластовые композиции. Они изготавливаются пропиткой высокопористого металлического слоя, нанесенного на металлическую подложку, сuspензией фторопласта. Антифрикционные свойства слоя достигаются за счет наполнителей типа графита, дисульфида молибдена и других веществ. Материалы могут быть использованы при скоростях скольжения до 6 м/с, давлении до 600 Н/см², в вакууме, при низких или повышенных температурах (250° С). Коэффициент трения колебается от 0,08 до 0,25.

К металлофторопластовым композициям относятся материалы марок БрО10ФТ, БрОЦ6-6ФТ, БФГ-50, разработанные ИПМ АН УССР.

Для подшипников скольжения могут быть использованы также антифрикционные самосмазывающиеся материалы типа АМАН, работающие без смазки при температурах в диапазоне (-100)–(+300)° С. Материалы разработаны Ин-том элементоорганических соединений АН СССР и Ин-том машиноведения АН СССР. Детали из материалов АМАН изготавливаются горячим прессованием специальных смол с наполнителями. Прессованные детали могут обрабатываться любым видом механической обработки. Допустимые нагрузки составляют 100 Н/см² при скорости скольжения до 4 м/с.

Материалы типа АМАН используются в паре с валами из стали 2Х13, закаленной до твердости 35 по Роквеллу и обработанной с шероховатостью $R_a = 0,16$ мкм. Данные материалы приведены в табл. 6.24.

Антифрикционные материалы хрупки, работают при сжимающих нагрузках.

В конструкции подшипников скольжения необходимо обеспечивать равенство коэффициентов линейного расширения антифрикционных и конструкционных материалов, а также хороший теплоотвод. Обработка материалов производится твердосплавным инструментом. Применение антифрикционных материалов для конкретных условий эксплуатации следует согласовывать с разработчиком материала.

При проектировании подшипника скольжения важно правильно выбрать материал подшипника и определить диаметр цапфы вала. Нагрузка на подшипник и скорость скольжения не должны превышать допустимых значений. Нагрузка подшипника (Н/м²) определяется по формуле $p = P/(ld)$, где P — реакция в подшипнике, Н. Скорость скольжения (м/с) находится по формуле $v = \pi dn/60$, где n — частота вращения вала, об/мин.

Если подшипник работает в жидкости, то величина диаметрального зазора Δ должна обеспечить жидкостное трение с достаточным запасом

Таблица 6.24. Свойства антифрикционных самосмазывающихся материалов

Параметр	Марка									
	АМАН1	АМАН22	АМАН24	АМАН7	АМАН10	АМАН12	АМАН13	АМАН15	АМАН21	АМАН23
Плотность ρ , г/см ³	3,6	3,7	3,2	2,5	2,5	5,0	2,0	2,7	2,7	3,2
Твердость по Бринеллю	25	31	29	20	18	23	28	25	23	23
Предел прочности при сжатии σ , Н/мм ²	80	150	90	120	100	130	130	100	80	100
Коэффициент трения k	0,05	0,08	0,08	0,15	0,04	0,10	0,08	0,08	0,08	0,06
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, ($^{\circ}$ С) ⁻¹ , в интервале температур $(+20) - (-196)^{\circ}$ С	10	12	20	15,4	—	16	28	—	—	—
Допустимая рабочая температура t_p , $^{\circ}$ С	220	250	250	150	200	300	120	200	200	170
Теплопроводность λ , Вт/(м \cdot $^{\circ}$ С)	—	—	0,598	0,598	—	—	0,470	—	—	—

надежности. Обычно принимают отношение длины антифрикционной втулки l к диаметру вала d , равное 0,5—1,0, а отношение диаметрального зазора Δ к диаметру вала d , равное 0,001—0,004. Отношение Δ/d должно быть проверено по условию ламинарного движения жидкости в зазоре. Необходимо, чтобы $\Delta/d \leqslant 1350 [v/(d^2 n)]^{2/3}$, где v — кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$. Кроме того, необходимо, чтобы величина $\Delta/2 \geq k_3 (H_1 + H_2)$, где H_1 и H_2 — высоты микронеровностей, определяемые по шероховатости поверхностей цапфы вала и антифрикционной втулки; k_3 — коэффициент запаса толщины пленки жидкости; при постоянной нагрузке $k_3 = 1,5 \div 2$; при переменных нагрузках $k_3 = 2,5 \div 4$.

Цапфы обрабатываются тонким точением или шлифованием до получения 8—10-го классов шероховатости. Антифрикционные втулки изготавливают по 2-му классу точности и обрабатывают тонким точением до получения 8-го класса шероховатости. На поверхности втулки выполняют канавки переменной глубины, по которым жидкость поступает в подшипник. В подшипниках, работающих без смазки, сопряжение втулки с цапфой вала осуществляется по ходовой посадке 2-го класса точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке механизмов на основании анализа технического задания, параметров проектируемой системы, условий эксплуатации и вида нагрузки производится выбор конструктивного варианта механизма. После этого выполняются электромагнитные, основные механические и тепловые расчеты, расчет эксплуатационных характеристик механизма, выбор вида подшипниковых опор, системы смазки и способа охлаждения. Затем разрабатывается конструкция механизма. При этом следует добиваться качества конструкции в сочетании с ее технологичностью, стремиться к обеспечению высокой эксплуатационной надежности, минимальным габариту и массе, простоте обслуживания, сборки и наладки, обеспечению необходимого охлаждения. В ходе разработок конструкции производится вентиляционный расчет, определяются размеры вентилятора. При гидравлическом охлаждении определяется гидравлическое сопротивление системы охлаждения. Производятся расчеты горячих и прессовых посадок, прочности вала, вращающихся элементов, критической скорости вращения роторов с учетом сил одностороннего магнитного притяжения и жесткости деталей, расположенных на валу. Определяется масса механизма.

Специфической особенностью СММ является прохождение магнитного потока по деталям механизма. В связи с этим соединение деталей, образующих магнитную цепь механизма, должно осуществляться с минимально возможными зазорами, а подшипниковые узлы должны быть выведены из зоны прохождения магнитного потока.

Выбор материалов для деталей механизма должен соответствовать их назначению. Магнитопроводы изготавливаются из магнитомягкой стали с прочностью, соответствующей механическим нагрузкам. Экраны выполняются из немагнитных сталей или сплавов с высокими механической прочностью и электросопротивлением. При необходимости эти материалы должны быть также коррозиестойкими. Защитные покрытия должны обеспечивать возможность длительной эксплуатации механизма.

При изготовлении магнитные свойства металлов, из которых изготавливаются детали магнитопровода и экран, должны проверяться.

Конструкция механизма должна быть принципиально проста и исключать возникновение явлений, не поддающихся предварительному учету. Механические напряжения и уровень нагрева конструкции должны соответствовать выбранным материалам.

Подшипниковые узлы должны быть надежны и обеспечивать постоянство рабочих зазоров между движущимися деталями механизма.

Конструкция подшипниковых узлов должна обеспечивать минимальную несоосность подшипников, установленных на концах вала. Должны быть предусмотрены отвод теплоты, выделяющейся в подшипнике, и смазка. Замена смазки должна производиться без полной разборки механизма. Следует предусматривать уплотнения, предотвращающие попадание смазки в рабочие зазоры механизма или вытекание ее наружу. В экранированных механизмах подшипниковые узлы, находящиеся под экраном, должны безотказно работать без обслуживания и наблюдения в течение определенного заданного промежутка времени.

Движущиеся детали механизмов должны быть механически прочны при испытательных скоростях движения и максимальной рабочей температуре. Детали, установленные на валах, должны быть надежно закреплены без возможности смещения при любых режимах эксплуатации. Для закрепления деталей на валах желательно применение сварки, горячих или прессовых посадок. В конструкции врачающихся роторов необходимо предусматривать возможность балансировки.

При необходимости малошумности механизма вращающиеся детали должны иметь обтекаемые аэродинамические формы. Зубцовые зоны при этом заливаются алюминием или эпоксидными смолами.

Неподвижные детали, корпуса, магнитопроводы должны быть механически прочными и жесткими, обеспечивать точность и соосность установки подшипников и экрана.

Крепежные элементы — болты или шпильки — должны обеспечивать фиксацию сопрягаемых деталей с заданной точностью взаиморасположения. Конструкция сопряжения деталей выбирается с учетом технологичности, причем число типоразмеров крепежных деталей принимается минимально возможным. Крепежные элементы рассчитываются на прочность по усилиям, возникающим при эксплуатации.

При разработке обмотки возбуждения механизма следует обеспечить достаточную электрическую прочность корпусной и витковой изоляции, что достигается выбором соответствующих марки провода, изоляционных материалов, пропиточных лаков и эмалей. Стабильность характеристик обмотки обеспечивается технологией ее пропитки и сушки. Катушка возбуждения должна быть надежно зафиксирована относительно магнитопровода. Охлаждение катушки должно обеспечивать отсутствие местных перегревов, вызывающих ускоренное старение изоляции. Следует обратить внимание на надежность паяных соединений в обмотке и выводов.

Выполнение указанных положений, а также приведенные в справочнике материалы позволяют спроектировать надежно работающие магнитные и электромагнитные механизмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные центробежные насосные агрегаты. Под ред. Г. М. Заславского. М., Машиностроение, 1967.
2. Арнольд Р. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М., Энергия, 1969.
3. Арнополин А. Г., Шевченко Н. Ф. Взрывозащищенное электрооборудование. М., Энергия, 1973.
4. Бертинов А. И., Миронов О. М., Базаров В. Н. Охлаждение авиационных электрических машин. МАИ, 1974.
5. Бертинов А. И., Риznик Г. А. Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока. М., Оборонгиз, 1958.
6. Бертинов А. И., Алиевский Б. А., Троицкий С. Р. Униполярные электрические машины. М.—Л., Энергия, 1966.
7. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Шиейдерович Р. М. Расчет на прочность деталей машин. Справочное пособие. М., Машиностроение, 1966.
8. Борисенко А. И., Данько В. Г., Яковлев А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. М., Энергия, 1974.
- ✓ 9. Буль Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М., Энергия, 1964.
- ✓ 10. Воробьева Т. М. Электромагнитные муфты. Л., ГЭИ, 1960.
11. Ганзбург Л. Б., Глуханов Н. П., Рейфе Е. Д., Федотов А. И. Механизмы с магнитной связью. Л., Машиностроение, 1973.
12. Герцов С. М. Расчет реактивных магнитных экранированных муфт. — Электротехника, 1968, № 9, с. 36—39.
13. Герцов С. М., Минкни М. М. Экранированные магнитные муфты. — В кн.: Труды 3 Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, Зиннатне, 1966, с. 121—135.
14. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. М., Металлургия, 1974.
15. Грнб В. В., Лазарев Г. Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М., Наука, 1968.
16. Исаченко В. П., Осинкова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М., Энергия, 1969.
17. Краткий справочник машиностроителя. Под ред. С. А. Чернавского. М., Машиностроение, 1966.
18. Краутман В. Р., Левченко С. И., Литвинова И. В. Новые перспективные области применения ферритовых постоянных магнитов. М., ЦНИИ «Электроника», 1975. [Обзоры по электронной технике, сер. 6, вып. 3 (314).]

19. Красовский Б. Н. Основы конструирования транспортных электрических машин. Л., Энергия, 1970.
20. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по тепло-передаче. М.—Л., ГЭИ, 1959.
21. Марочник сталей и сплавов. М., ЦНИИТмаш, 1971.
22. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Т. 1—5. Справочник под ред. И. В. Кудрявцева. М., Машиностроение, 1967.
23. Мизюрин С. Р., Ермилов М. А. Проектирование магнитно-гистерезисных муфт. МАИ, 1966.
24. Миткевич А. В. Стабильность постоянных магнитов. Л., Энергия, 1971.
25. Морозов А. Г. Расчет электрических машин постоянного тока. М., Высшая школа, 1977.
26. Муха Т. И., Януш Б. В., Цупиков А. П. Приводы машин. Справочник. Под ред. В. В. Длоугого. Л., Машиностроение, 1975.
27. Науменко В. И., Клочкив О. Г. Авиационные электрические машины с интенсивным охлаждением. М., Машиностроение, 1977.
28. Орлов П. И. Основы конструирования. 2-е изд. М., Машиностроение, 1977.
29. Особенности сборки приспособлений с оксидно-бариевыми магнитами. Л., ЦБТИ, 1966.
30. Постников И. М. Проектирование электрических машин. Киев, Гостехиздат УССР, 1960.
31. Постоянные магниты. Справочник. Под ред. Ю. М. Пятиной, М., Энергия, 1971.
32. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы. М., Высшая школа, 1976.
33. Прецизионные сплавы. Справочник. Под ред. Б. В. Молотилова. М., Машиностроение, 1974.
34. Приборостроение и средства автоматики. Справочник. Т. 2, кн. 1. М., Машиностроение, 1964.
35. Рот А. Вакуумные уплотнения. М., Энергия, 1971.
36. Сенкевич А. М. Постоянные магниты. М., ВВА им. Н. Г. Жуковского, 1946.
37. Серенсен С. В., Громан М. Б., Кочаев Е. П. и др. Валы и оси. М., Машиностроение, 1970.
38. Сливинская А. Г., Гордон А. В. Постоянные магниты. М.—Л., Энергия, 1965.
39. Справочник по электротехническим материалам. Под ред. Ю. В. Корицкого и др. 2-е изд. Л., Энергия, 1976.
40. Хронин Д. В. Методика расчета критических чисел оборотов роторов ТНА. МАИ, 1972.
41. Хрульков В. А. Механическая обработка изделий из магнитных материалов. М., Машиностроение, 1966.
42. Шабашов А. П., Николаев Е. А. Магнитные системы для передачи движения через перегородку. — Вестник машиностроения, № 6, 1970.
43. Шашанов Л. Н. Механическая система высокоскоростных электродвигателей. М., Энергия, 1971.
44. Каталоги фирм: F. Klaus, ФРГ, 1959, «Howard mechanical developments», Англия, 1959, «Friedrich Unde GMBH», ФРГ, 1963.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

В

- Взрывозащищенное исполнение СММ 19
Выступающие концы валов 306
—, конструкция 306
—, размеры 307

Г

- Гистерезисные материалы 231
—, основные характеристики 232

К

- Классы нагревостойкости 265
Компаунды 271
—, свойства 275

Л

- Лаки покрытие 269
— пропиточные 265

М

- Магниты постоянные из порошков 220
— металлокерамические 223
—, методы соединения с арматурой 230
—, намагничивание и размагничивание 228
—, общие положения 217
— оксидные (ферриты) 223
—, свойства 224

- , проверка расчета 100
— редкоземельные 225
— сплавы железо—никель—алюминий 218
—, —, —, свойства 221
— стабильность характеристик 226
Материалы изоляционные, бумага конденсаторная 276
—, гетинакс 291
—, лакоткани 283
— стекловолокнистые 280
— текстильные 278
— текстолит 290
— фторопласт 282
— электрокартон 278
— эмали 268
Механизмы магнитные, выбор схемы 14
—, конструктивные схемы 9
—, примеры конструкций муфт вращения 20
—, принцип действия 5

П

- Подшипники качения, крепление на вал 317
— смазка жидким маслом 318
—, — туманом 321
—, сортамент 238
—, уплотнения лабиринтные 324
—, — манжетные 323
—, — сальниковые 322
—, установка в корпус 317
— скольжения 344
Провода обмоточные, диаметры и сечения 294

- повышенной нагревостойкости 302
- , характеристики 299
- Проводимости магнитные 101

P

- Расчет валов 178
 - на жесткость 179
 - на прочность 181
- вентилятора 134
- осевого 136
- центробежного 134
- критической частоты вращения 182
- обмотки возбуждения 116
- остаточной неуравновешенности 173
- подшипников 188
- прочности полумуфт 187
- фланцев 151
- экранов и корпусов 165
- сил одностороннего магнитного притяжения 122
- тепловой 124
- водяного охлаждения 138
- воздушного охлаждения 132
- корпуса 124
- ребрения 126
- теплопередачи в конструкции 130
- характеристик СММ
- электромагнитный магнитно-гистерезисных муфт 83
- механизма поступательного перемещения 46
- механизмов с ферритами бария или РЗМ 78
- одноименно-полюсной муфты вращения 26
 - , главные размеры 26
 - , диаметр внутренней полумуфты 29

- к. п. д. 32
- , магнитная цепь 31
- переменно-полюсной муфты вращения 71
- редуктора 59
- Ряд нормальный высот осей вращения 305
- мощностей 305
- частот вращения 305

C

- Сплавы алюминиевые, использование 213
- , коррозионные свойства 217
- , физические и механические свойства 214
- титановые, механические свойства 210
- , физические свойства 207
- Стали магнитно-мягкие, кривая намагничивания 204
- , физические и механические свойства 197
- немагнитные 197
- , физические и механические свойства 206

У

- Узлы подшипниковые 316

Ф

- Фланцы вакуумные 325
- , работающие под давлением 334

Ш

- Шлицы 313
- Шпонки 310

Щ

- Щетки контактные 262

Л.Б. ГАНЗБУРГ
А.И. ФЕДОТОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
И МАГНИТНЫХ
МЕХАНИЗМОВ

СПРАВОЧНИК

ЛЕНИНГРАД
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1980

ББК 34.42

Г19

УДК 621.825.3:62-685.3

Р е ц е н з е н т канд. техн. наук доц. М. Д. Лабзин

Ганзбург Л. Б., Федотов А. И.

Г19 Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. — Л.; Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980.— 364 с., ил.

1 р. 40 к.

В справочнике приведены материалы, необходимые для проектирования бесконтактных механизмов, между элементами которых действуют механические силы, возникающие при прохождении магнитного потока через детали механизма. Рассмотрены конструктивные схемы механизмов, области применения, примеры конструкций. Даны последовательность электромагнитных и механических расчетов. Помещен обширный справочный материал.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и изготовлением магнитных механизмов.

Г 31301-249
038(01)-80 249-80. 2702000000

ББК 34.42
6П5.2