

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. Проектирование асинхронных машин

В асинхронных машинах преобразование энергии происходит при несинхронном (асинхронном) вращении ротора и магнитного поля статора [6].

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В двигательном режиме разница частот вращения ротора и поля статора в большинстве случаев невелика и составляет лишь несколько процентов. Поэтому частоту вращения ротора оценивают не в абсолютных единицах (об/мин или об/с), а в относительных, вводя понятие скольжения:

$$s = (n_c - n)/n_c,$$

где n_c — частота вращения поля (синхронная частота вращения); n — частота вращения ротора.

Скольжение выражается либо в относительных единицах ($s = 0,02; 0,025$ и т. п.), либо в процентах ($s = 2\%; 2,5\%$ и т. п.).

Частота тока и ЭДС, наводимая в проводниках обмотки ротора зависят от частоты тока и ЭДС обмотки статора и от скольжения:

$$f_2 = f_{1s}; \quad E'_2 = E_{1s},$$

где E_1 — ЭДС обмотки статора; E'_2 — ЭДС обмотки ротора, приведенная к числу витков обмотки статора.

Теоретически асинхронная машина может работать в диапазоне изменения скольжения $s = -\infty \dots +\infty$ (рис. 9.1), но не при $s = 0$, так как в этом случае $n = n_c$ и проводники обмотки ротора неподвижны относительно поля статора, ЭДС и ток в обмотке равны нулю и момент отсутствует. В зависимости от практически возможных скольжений различают несколько режимов работы асинхронных машин (рис. 9.1): генераторный режим при $s < 0$, двигательный при $0 < s < 1$, трансформаторный при $s = 1$ и тормозной при $s > 1$. В генераторном режиме ротор машины вращается в ту же сторону, что и поле статора, но с большей частотой.

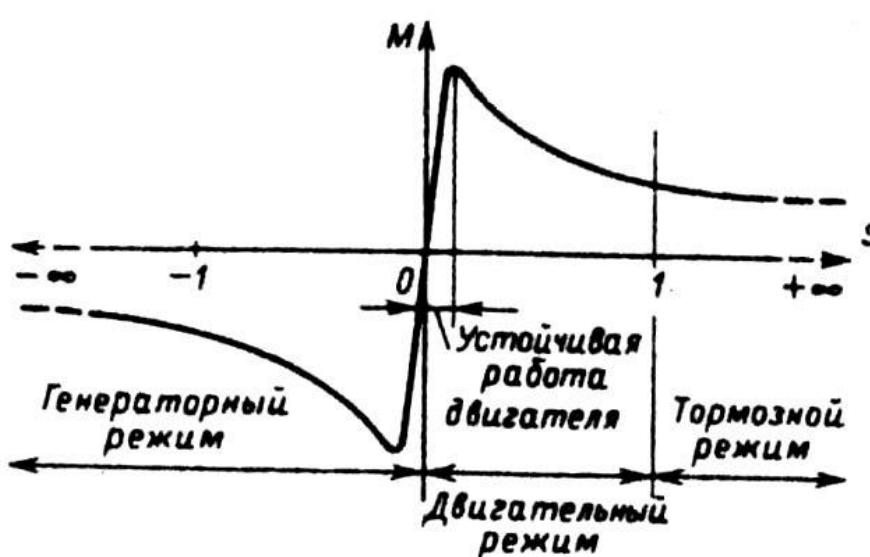


Рис. 9.1. Механическая характеристика асинхронной машины

В двигательном — направления вращения поля статора и ротора совпадают, но ротор вращается медленнее поля статора: $n = n_c(1 - s)$. В трансформаторном режиме ротор машины неподвижен и обмотки ротора и статора не перемещаются относительно друг друга. Асинхронная машина в таком режиме представляет собой трансформатор и отличается от него расположением первичной и вторичной обмоток (обмотки статора и ротора) и наличием воздушного зазора в магнитопроводе. В тормозном режиме ротор вращается, но направление его вращения противоположно направлению поля статора и машина создает момент, противоположный моменту, действующему на вал. Подавляющее большинство асинхронных машин используют в качестве двигателей, и лишь очень небольшое количество — в генераторном и трансформаторном режимах, в тормозном режиме — кратковременно.

Для оценки механической характеристики асинхронного двигателя моменты, развиваемые двигателем при различных скольжениях, обычно выражают не в абсолютных, а в относительных единицах, т. е. указывают кратность по отношению к номинальному моменту: $M^* = M/M_{\text{ном}}$. Зависимость $M^* = f(s)$ асинхронного двигателя (рис. 9.2) имеет несколько характерных точек, соответствующих пусковому $M^*_{\text{п}}$, минимальному M^*_{min} , максимальному M^*_{max} и номинальному $M^*_{\text{ном}}$ моментам.

Пусковой момент $M^*_{\text{п}}$ характеризует начальный момент, развиваемый двигателем непосредственно при включении его в сеть при неподвижном роторе ($s = 1$). После трогания двигателя с места его момент несколько уменьшается по сравнению с пусковым (см. рис. 9.2). Обычно M^*_{min} на 10... 15 % меньше $M^*_{\text{п}}$. Большинство двигателей проектируют так, чтобы их M_{min} было больше $M_{\text{ном}}$, так как они могут достигнуть номинальной скорости лишь при условии, что момент сопротивления, приложенный к валу, будет меньше, чем M_{min} .

Максимальный момент M^*_{max} характеризует перегрузочную способность двигателя. Если момент сопротивления превышает M^*_{max} , двигатель останавливается. Поэтому M^*_{max} называют также критическим, а скольжение, при котором момент достигает максимума, — критическим скольжением $s_{\text{кр}}$. Обычно $s_{\text{кр}}$ не превышает 0,1...0,15; в двигателях с повышенным скольжением (крановых, металлургических и т. п.) $s_{\text{кр}}$ может быть значительно большим.

В диапазоне $0 < s < s_{\text{кр}}$ характеристика $M = f(s)$ имеет устойчивый характер. Она является рабочей частью механической характеристики двигателя. При скольжениях $s > s_{\text{кр}}$ двигатель в нормальных условиях работать не может. Эта часть характеристики определяет пусковые свойства двигателя от момента пуска до выхода на рабочую часть характеристики.

Трансформаторный режим, т. е. режим, когда обмотка статора подключена к сети, а ротор неподвижен, называют также режимом короткого замыкания двигателя. При $s = 1$ ток

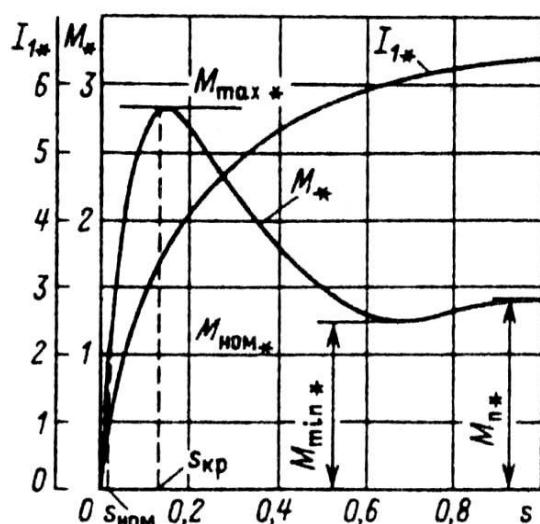


Рис. 9.2. Зависимость тока и момента асинхронного двигателя от скольжения

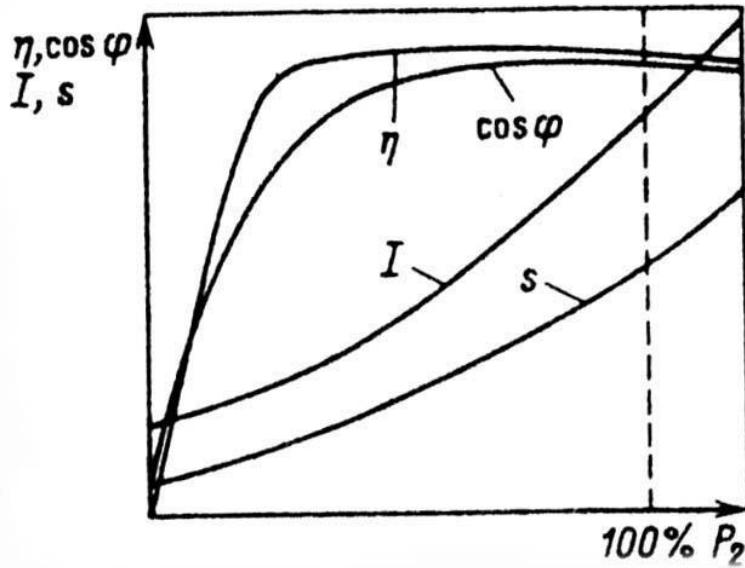


Рис. 9.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

двигателя в несколько раз превышает номинальный, а охлаждение много хуже, чем при номинальном режиме. Поэтому в режиме короткого замыкания асинхронный двигатель, не рассчитанный для работы при скольжениях, близких к единице, может находиться лишь в течение нескольких секунд.

Режим короткого замыкания возникает при каждом пуске двигателя, однако в этом случае он кратковременен. Несколько пусков двигателя с короткозамкнутым ротором подряд или через короткие промежутки времени могут привести к превышению допустимой температуры его обмоток и к выходу двигателя из строя.

Для работы асинхронных машин со скольжениями, близкими к единице, в трансформаторном или тормозном режимах их рассчитывают с пониженными электромагнитными нагрузками. Примером использования асинхронных машин, номинальным режимом для которых является трансформаторный, могут служить индукционные регуляторы или фазовращатели [6].

Рабочие характеристики асинхронных двигателей (рис. 9.3) показывают, что наибольшего КПД правильно спроектированный двигатель достигает при нагрузке, на 15...20% меньше номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них из-за стандартной дискретной шкалы мощностей работают с недогрузкой. Напомним, что наибольший КПД будет у двигателя при нагрузке, при которой постоянные не зависящие от тока потери (потери в стали, механические, вентиляционные) будут в сумме равны переменным, зависящим от тока, — электрическим потерям в обмотках двигателя (см. гл. 6). Это позволяет при проектировании направленным выбором плотности тока в обмотках и индукции на участках магнитопровода определить нагрузку, при которой КПД достигнет наибольшего значения.

Конструктивные исполнения асинхронных двигателей по способу монтажа соответствуют ГОСТ 2479. Наибольшее распространение получили группы исполнения IM2-IM4 (см. гл. 1), т.е. двигатели со станиной на лапах или с разного вида фланцами на станине или на подшипниковом щите. Среди двигателей малой мощности встречаются группы исполнения IM5 — машины без подшипниковых щитов и IM9 — машины специального исполнения, которые часто применяют как встроенные в различные механизмы, в ручной

электрифицированный инструмент и т. п. Асинхронные двигатели мощностью более 1000 кВт, особенно с малой частотой вращения, часто выполняют с выносными подшипниками стойками — группа исполнения IM7 или IM8.

По степени защиты от воздействия окружающей среды наиболее характерны для двигателей малой и средней мощности исполнения IP44 и IP54 со способом охлаждения IC0141. Двигатели средней мощности выпускают также со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01. Двигатели большой мощности на высокое напряжение часто имеют закрытое исполнение со встроенным воздушным или водяным охладителем, например с охлаждением по способу IC37A81 (см. гл. 7).

Сердечники статоров и роторов всех асинхронных двигателей общего назначения шихтуют из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. При длине сердечника менее 250...300 мм они выполняются без вентиляционных каналов. При большей длине сердечники подразделяют на пакеты длиной 40...50 мм каждый. Между пакетами устанавливают дистанционные распорки, при этом образуются радиальные вентиляционные каналы, служащие для прохода охлаждающего воздуха. Ширина каналов в большинстве машин выполняется равной 10 мм. В собранной машине радиальные каналы статора и ротора располагаются напротив друг друга.

Статоры машин общего назначения напряжением до 660 В, мощностью до 100 кВт имеют трапециoidalные полузакрытые пазы с узким шлицем (см. рис. 3.4), размерные соотношения которых (ширину верхней и нижней частей и высоту паза) выполняют такими, чтобы зубцы статора имели параллельные стенки. Это уменьшает МДС зубцов по сравнению с зубцами с неравномерной площадью поперечного сечения. Обмотку таких машин выполняют из круглого провода.

В статорах машин большей мощности обмотку выполняют из прямоугольного провода, причем при напряжении, не превышающем 660 В, из подразделенных катушек. Пазы статора в таких машинах полуоткрытые (см. рис. 3.6, а), что позволяет избежать большой неравномерности индукции в воздушном зазоре. Обмотку укладывают в пазы, пропуская через суженный шлиц паза каждую из полукатушек поочередно (см. гл. 3).

В статорах машин с номинальным напряжением 3 кВ и выше и машин специального исполнения независимо от напряжения выполняют обмотку из жестких, изолированных до укладки в пазы катушек. Поэтому пазы таких машин делают только открытыми (см. рис. 3.6, б).

Конструкция крепления сердечника статора в корпусе зависит от габаритов и мощности машины. В большинстве машин малой мощности корпуса выполняют из алюминия, в некоторых конструкциях - заливкой алюминия на собранный сердечник статора. Подшипниковые щиты также алюминиевые. В машинах большей мощности и корпуса, и подшипниковые щиты чугунные. В машинах больших габаритов корпуса сварные из стальных листов, закрытые снаружи листовой сталью. Магнитопровод крепится к продольным ребрам корпуса.

Магнитопроводы роторов шихтуют из той же стали, что и статоров. В двигателях общего назначения с высотой оси вращения до 450 мм их насаживают непосредственно на вал, причем до высоты оси вращения 250 мм — на гладкий вал; в двигателях с большей высотой оси вращения — крепят на валу с помощью шпонки. Сердечники роторов больших габаритов насаживают на втулку или на остов ротора.

В большинстве асинхронных двигателей вентиляторы устанавливают на валу ротора, в двигателях со степенью защиты IP23 - внутри корпуса, со степенью защиты IP44 и IP54 — вне корпуса и защищают кожухом.

Асинхронные двигатели подразделяют на два типа: с короткозамкнутыми (рис. 9.4) и фазными (рис. 9.5) роторами. По конструкции они отличаются между собой только роторами и отдельными элементами корпусов. В пазах фазных роторов располагают изолированную

трехфазную обмотку, жестко соединенную в звезду или в треугольник. Обмотка имеет три вывода, которые соединены токопроводами с контактными кольцами. Прилегающие к контактным кольцам щетки электрически соединяют выводы обмотки ротора с пусковым реостатом, который позволяет увеличивать сопротивление роторной цепи во время пуска двигателя. Контактные кольца располагают либо внутри корпуса, либо вне его на выступающем конце вала. При такой конструкции кольца и весь щеточный аппарат закрывают кожухом из листовой стали.

При пуске двигателя между кольцами включают пусковые резисторы, что увеличивает активное сопротивление цепи ротора и, следовательно, пусковой момент двигателя и ограничивает ток при пуске и разгоне. По мере разгона группы резисторов пускового реостата поочередно замыкают, причем время замыкания очередной группы выбирают таким, чтобы до

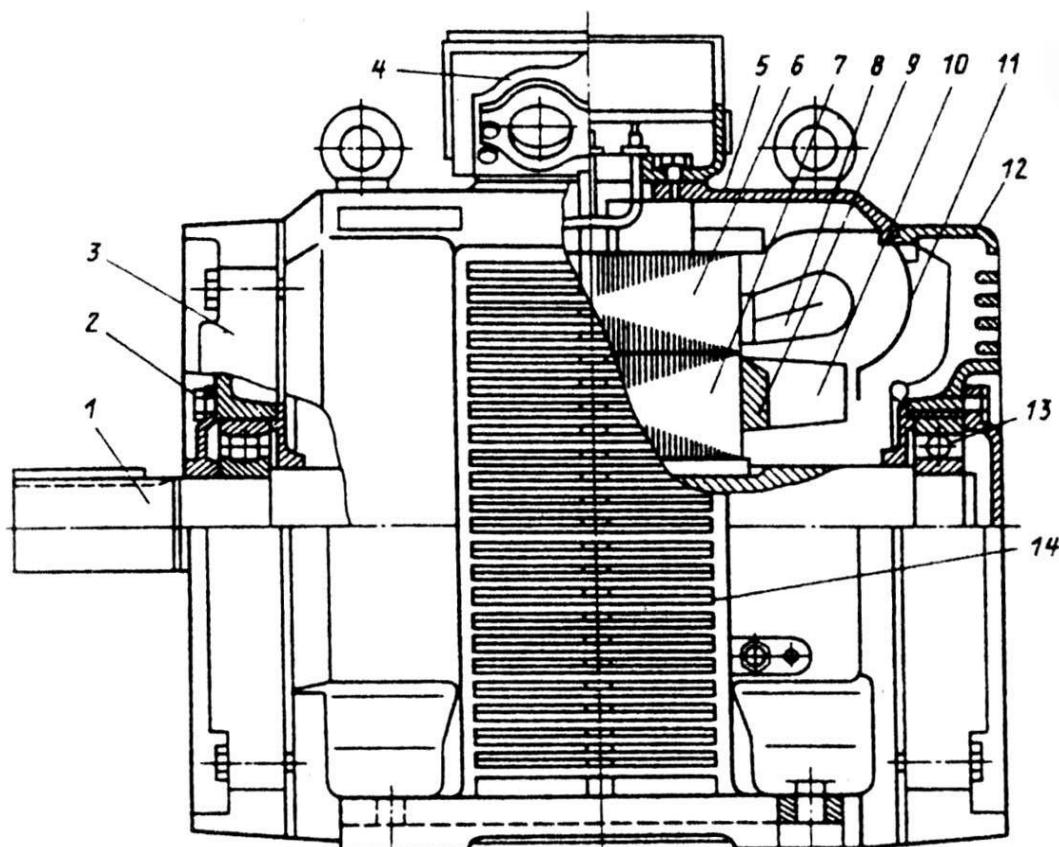


Рис. 9.4. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23, h = 225 мм:

1 — вал; 2, 13 — подшипники; 3, 12 — подшипниковые шиты; 4 — коробка выводов; 5 — корпус. 6 — сердечник статора; 7 — сердечник ротора; 8 — лобовые части обмотки статора; 9 — короткозамыкающие кольца обмотки ротора; 10 — вентиляционные лопатки ротора; 11 — диффузор; 14 — жалюзи корпуса

достижения номинальной частоты вращения во время всего пускового периода момент и ток двигателя изменялись в определенных пределах (рис. 9.6).

Включение резисторов в цепь ротора используют также для и плавного регулирования частоты вращения. Однако эта возможность ограничена возникновением больших потерь в резисторах, по которым проходит фазный ток ротора. В ряде приводов, например в крановых, такой способ регулирования все же применяют, но в этом случае используют не пусковой, а регулировочный реостат, рассчитанный на длительную работу при больших токах.

Обмотки короткозамкнутых роторов не имеют изоляции. В двигателях общего назначения мощностью до 300...400 кВт их выполняют заливкой пазов алюминием или его сплавами, причем одновременно со стержнями обмотки отливают замыкающие кольца с

вентиляционными лопатками (см. рис. 3.10). В ряде конструкций двигателей этой мощности и во всех двигателях большей мощности обмотку роторов изготавливают из вставных стержней, в подавляющем большинстве случаев — медных. К выступающим из пазов концам стержней припаивают или привариваются замыкающие кольца.

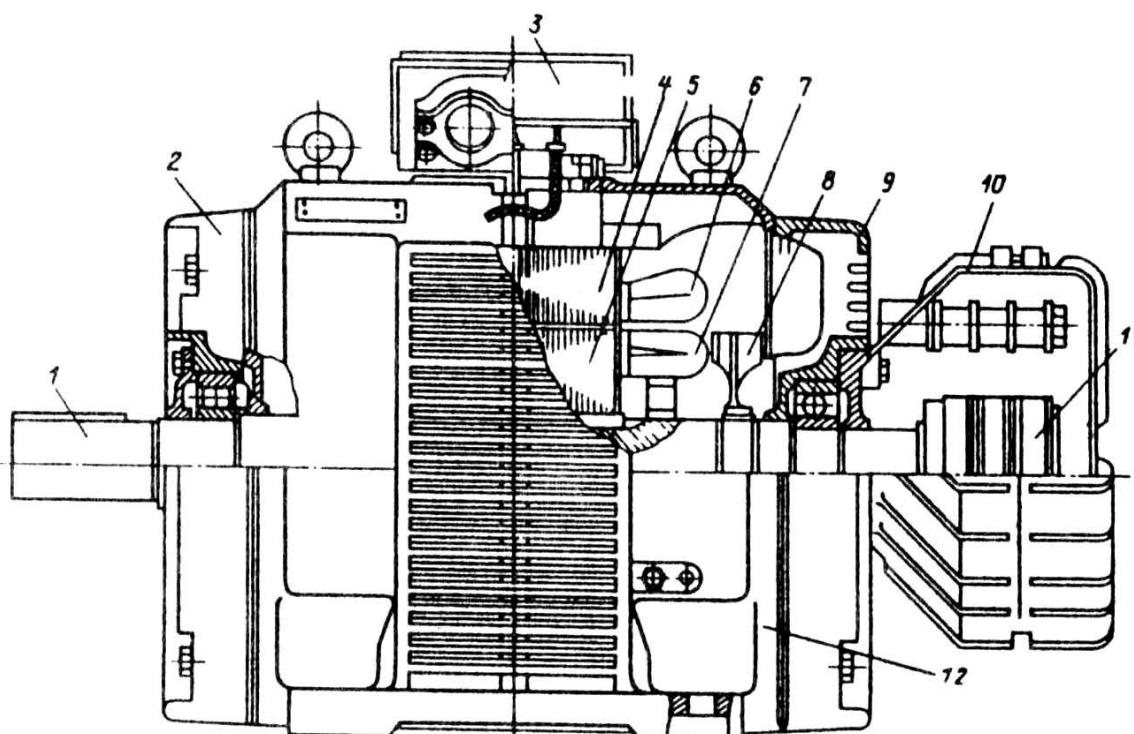


Рис. 9.5. Двигатель серии АИ с фазным ротором
со степенью защиты IP23, A=225 мм:

1 — вал; 2,9 — подшипниковые щиты; 3 — коробка выводов; 4 — сердечник статора; 5 — сердечник ротора; 6 — лобовые части обмотки статора; 7 — лобовые части обмотки ротора; 8 — вентилятор; 10 — кожух контактных колец; 11 — контактные кольца; 12 — корпус

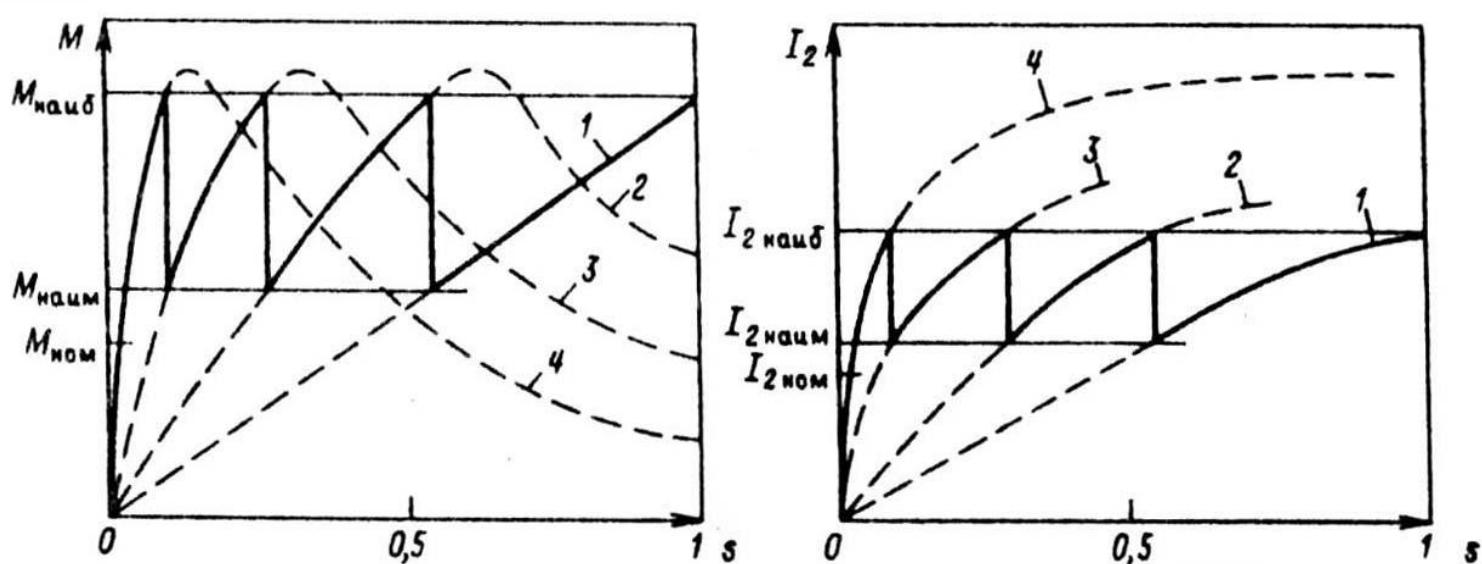


Рис. 9.6. Изменение тока и момента при реостатном пуске
асинхронного двигателя с фазным ротором:

1—3 — характеристики при различных ступенях пускового реостата с последовательно убывающими значениями сопротивлений; 4 — естественные характеристики; $M_{\text{наиб}}$, $M_{\text{наим}}$ — наибольший и наименьший моменты, развиваемые двигателем в процессе реостатного пуска; $I_{2\text{наиб}}$, $I_{2\text{наим}}$ — наибольший и наименьший токи ротора во время разгона двигателя

Технология изготовления роторов с короткозамкнутой обмоткой значительно проще, чем фазных. Кроме того, в связи с отсутствием изоляции, контактных колец, скользящих контактов и пусковых реостатов уменьшаются габариты и стоимость двигателей, повышается их надежность и упрощается техническое обслуживание и эксплуатация. Поэтому большинство современных асинхронных двигателей выполняют с короткозамкнутыми роторами. Одним из недостатков асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами является невозможность включить в цепь ротора во время пуска реостат для увеличения пускового момента и снижения тока. При проектировании двигателей с короткозамкнутыми роторами направленным выбором параметров ограничивают пусковой ток до 6 – 7 кратного по сравнению с номинальным, а для повышения пусковых моментов используют эффект вытеснения тока в стержнях обмотки ротора. Он заключается в неравномерном распределении плотности тока по поперечному сечению стержня. Под действием эффекта вытеснения плотность тока в ближайшей к дну паза части каждого стержня уменьшается, а в верхней возрастает. Неравномерность распределения плотности тока вызывает увеличение электрических потерь в обмотке, эквивалентное увеличению ее активного сопротивления, и пусковой момент двигателя возрастает.

Действие эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени при большей частоте тока, поэтому в двигательном режиме наибольшая неравномерность распределения плотности тока по сечению стержня наблюдается при $s = 1$, когда $f_2 = f_1$. При этом же скольжении будет и наибольшее эквивалентное сопротивление обмотки ротора, вызывающее увеличение пускового момента. При разгоне двигателя частота тока в роторе уменьшается ($f_2 = f_{1s}$) и соответственно уменьшается сопротивление обмотки. В режимах, близких к номинальному, частота тока в роторе мала, эффект вытеснения тока практически не проявляется и плотность тока одинакова по всему сечению стержней ротора.

Увеличение эквивалентного сопротивления под действием эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени в стержнях, поперечное сечение которых имеет большую высоту или уменьшенную площадь верхней части по сравнению с нижней. Поэтому в роторах двигателей, предназначенных для работы с тяжелыми условиями пуска, делают глубокие прямоугольные пазы (глубокопазные роторы) или стержни обмотки выполняют фигурными. Обмотки роторов с фигурными пазами выполняют в большинстве двигателей заливкой алюминием или его сплавами. Это позволяет выполнять конфигурацию пазов с оптимальными размерными соотношениями стержней для достижения требуемого действия эффекта вытеснения тока.

Еще больший эффект увеличения сопротивления при пуске возникает в роторах с двойной беличьей клеткой, в пазах которой друг над другом располагают стержни двух обмоток. Верхние стержни образуют одну обмотку, нижние — другую. При пуске, когда эффект вытеснения тока проявляется в наибольшей степени, практически весь ток протекает по верхней клетке. Ее называют пусковой. При работе в номинальном режиме и с малыми скольжениями действие эффекта вытеснения тока очень мало и ток распределяется равномерно по обеим обмоткам пропорционально их активному сопротивлению. Обмотку, образованную нижними стержнями, называют рабочей.

Обмотки роторов с двойной беличьей клеткой выполняют как литыми, так и из вставных стержней. В литых обмотках обе клетки — и рабочую, и пусковую — и замыкающие кольца одновременно заливают одинаковым металлом. В роторах со вставными стержнями рабочую обмотку выполняют из медных, а пусковую — обычно из латунных стержней. В таких роторах замыкающие кольца обмоток раздельные, из того же материала, что и стержни. Латунь применяют для пусковых клеток, так как она имеет большее удельное сопротивление, чем медь, и сопротивление обмотки ротора в пусковых режимах возрастает сильнее, чем при стержнях из одинакового материала. Кроме того, теплоемкость латуни выше, чем меди,

поэтому нагрев латунных стержней за время пуска двигателя ниже, чем медных того же размера.

Двигатели с фигурными пазами или с двойной клеткой на роторе имеют более высокие пусковые характеристики, чем с грушевидными или полуovalьными пазами, однако у них больше индуктивное сопротивление обмоток роторов. Это приводит к понижению максимальных моментов и ухудшению коэффициента мощности двигателей в номинальном режиме. Поэтому такие роторы выполняют лишь для двигателей, предназначенных для тяжелых условий пуска, для которых требования к пусковым характеристикам более важны, чем к другим энергетическим показателям [6].

9.2. ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

Асинхронные двигатели являются основными двигателями в электроприводах практически всех промышленных предприятий. В СССР выпуск асинхронных двигателей превышал 10 млн. штук в год. Наиболее распространены двигатели на номинальное напряжение до 660 В, суммарная установленная мощность которых составляет около 200 млн. кВт.

Двигатели серии 4А выпускались в 80-х г. XX в. в массовом количестве и в настоящее время эксплуатируются, практически, на всех промышленных предприятиях России. Серия охватывает диапазон мощностей от 0,6 до 400 кВт и построена на 17 стандартных высотах оси вращения от 50 до 355 мм (табл. 9.1 и 9.2). Серия включает основное исполнение двигателей, ряд модификаций и специализированные исполнения. Двигатели основного исполнения предназначены для нормальных условий работы и применяются двигателями общего назначения. Это трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частоту сети 50 Гц. Они имеют исполнение по степени защиты IP44 во всем диапазоне высот оси вращения и IP23 в диапазоне высот осей вращения 160...355 мм.

Т а б л и ц а 9.1. Увязка мощности высоты исполнение по степени
оси вращения двигателей серии 4А, защиты IP44

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника, станины	Мощность, кВт, при числе полюсов 2р					
		2	4	6	8	10	12
50	A	0,09	0,06	—	—	—	—
	B	0,12	0,09	—	—	—	—
56	A	0,18	0,12	—	—	—	—
	B	0,25	0,18	—	—	—	—
63	A	0,37	0,25	0,18	—	—	—
	B	0,55	0,37	0,25	—	—	—
71	A	0,75	0,55	0,37	—	—	—
	B	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—
80	A	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—
	B	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—
90	LA(B)	3	2,2	1,5	0,75; (1,1)	—	—
	S	4	3	—	—	—	—
100	L	5,5	4	2,2	1,5	—	—
	MA(B)	7,5	5,5	3(4)	2(3)	—	—
112	S	—	7,5	5,5	4	—	—
	M	11	11	7,5	5,5	—	—
132	S	15	15	11	7,5	—	—
	M	18,5	18,5	15	11	—	—
160	S	22	22	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15	—	—
180	M	37	37	22	18,5	—	—
	L	45	45	30	22	—	—
200	M	55	55	37	30	—	—
225	M	—	—	—	—	—	—

250	S	75	75	45	37	30	—
	M	90	90	55	45	37	—
280	S	110	ПО	75	55	37	—
	M	132	132	90	75	45	—
315	S	160	160	ПО	90	55	45
	M	200	200	132	ПО	75	55
355	S	250	250	160	132	90	75
	M	315	315	200	160	110	90

Таблица 9.2. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии 4А, исполнение по степени защиты IP23

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника станины	Мощность, кВт, при числе полюсов 2р					
		2	4	6	8	10	12
160	S	22	18,5	—	—	—	—
	M	30	22	—	—	—	—
180	S	37	30	10,5	15	—	—
	M	45	37	22	18,5	—	—
200	M	55	45	30	22	—	—
	L	75	55	37	30	—	—
225	M	90	75	45	37	—	—
250	S	110	90	55	45	—	—
	M	132	110	75	55	—	—
280	S	160	132	90	75	45	—
	M	200	160	110	90	55	—
315	S	—	200	132	110	75	55
	M	250	250	160	132	90	75
355	S	315	315	200	160	110	90
	M	400	400	250	200	132	110

В серии принята следующая система условных обозначений двигателей:

$\frac{4A}{1}$ $\frac{X}{2}$ $\frac{X}{3}$ $\frac{X}{4}$ $\frac{X}{5}$ $\frac{X}{6}$ $\frac{X}{7}$ $\frac{X}{8}$

Буквы и цифры в порядке следования их в условном обозначении означают следующее:

1 — название серии (4А);

2 — исполнение двигателей по степени защиты: буква Н — исполнение IP23, отсутствие буквы — исполнение IP44;

3 — исполнение по материалу станины и щитов: А — станина и щиты алюминиевые; X — станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов); отсутствие буквы — станина и щиты чугунные или стальные;

4 — высота оси вращения (две или три цифры), мм;

5 — установочный размер по длине станины: буквы S, M или L (меньший, средний или больший);

6 — длина сердечника: А — меньшая, В — большая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, M или L) выполняется только одна длина сердечника;

7 — число полюсов двигателя (одна или две цифры);

8 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150 (см. табл. 1.2).

Примеры обозначений двигателей серии 4А: 4А160М4У3 — асинхронный двигатель серии 4А исполнения по степени защиты IP44, с короткозамкнутым ротором, с чугунными станиной и подшипниковыми щитами, с высотой оси вращения 160 мм, средним установочным размером

по длине станины (М), четырехполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3.

4АНК28058УЗ — асинхронный двигатель серии 4А исполнения по степени защиты IP23, с фазным ротором, со стальной станиной и щитами высотой оси вращения 280 мм, с меньшим (S) установочным размером по длине станины, восьмиполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3.

Модификации и специализированные исполнения двигателей построены на базе основного исполнения и имеют те же принципиальные конструктивные решения основных элементов. Такие двигатели выпускаются отдельными отрезками серии на определенные высоты оси вращения и предназначены для применения в качестве приводов механизмов, предъявляющих специфические требования к двигателю или работающих в условиях, отличных от нормальных по температуре или чистоте окружающей среды, книжности и т. п.

К электрическим модификациям двигателей серии 4А относятся двигатели с повышенным номинальным скольжением, повышенным пусковым моментом, многоскоростные, частотой питания 60 Гц и т. п., к конструктивным модификациям — двигатели с фазным ротором, со встроенным электромагнитным тормозом, малошумные, со встроенной температурной защитой и т. п.

По условиям окружающей среды различают модификации двигателей тропического исполнения, влагоморозостойкого, химостойкого, сельскохозяйственного, пылезащищенные и др.

Специализированное исполнение имеют лифтовые двигатели, частотно-управляемые, высокоточные и др.

Двигатели различных модификаций и специализированного исполнения имеют те же обозначения, что и основного, но с добавочными буквами, проставляемыми либо после названия серии, либо после цифры, обозначающей число полюсов. Примеры обозначений модификаций и специализированных исполнений:

4АР... — двигатели с повышенным пусковым моментом;

4АС... — двигатели с повышенным номинальным скольжением;

4АК, 4АНК... — двигатели с фазным ротором, исполнения IP44 и IP23 соответственно;

4А...Е... — двигатели со встроенным электромагнитным тормозом;

4А...ОМ — двигатели для речных и морских судов гражданского флота.

Номинальное напряжение двигателей и число выводных концов обмотки статора в зависимости от высоты оси вращения приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3. Напряжения и число выводов

Мощность, кВт	Напряжение, В	Число выводных концов обмотки статоров
0,06—0,37	220 или 380	3
0,55—11	220, 380 или 660	3
15—110	220/380 и 380/660	6
132—400	380/660	6

Большинство двигателей серии 4А имеет степень защиты IP44 и выпущено в конструктивном исполнении, относящемся к группе IM1, т. е. с горизонтальным валом, на лапах, с двумя подшипниковыми щитами (рис. 9.7). Корпус двигателей выполнен с продольными радиальными ребрами, увеличивающими поверхность охлаждения и улучшающими отвод тепла от двигателя в окружающий воздух. На противоположном от рабочего конце вала укреплен вентилятор, прогоняющий охлаждающий воздух вдоль ребер корпуса. Вентилятор закрыт кожухом с отверстиями для прохода воздуха. В двигателях малой

мощности вентилятор и кожух пластмассовые, в более мощных вентилятор литой из алюминиевого сплава, а кожух штампованый из тонкой листовой стали.

Магнитопровод двигателей — шихтованный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем двигателей с $h = 50\ldots250$ мм из стали марки 2013, а двигателей с $h = 280\ldots355$ мм — из стали марки 2312.

Листы сердечника статора в двигателях малой мощности крепят после опрессовки проваркой по наружной поверхности в нескольких местах, а в двигателях большей мощности — стальными скобами, которые установлены по наружной поверхности сердечника.

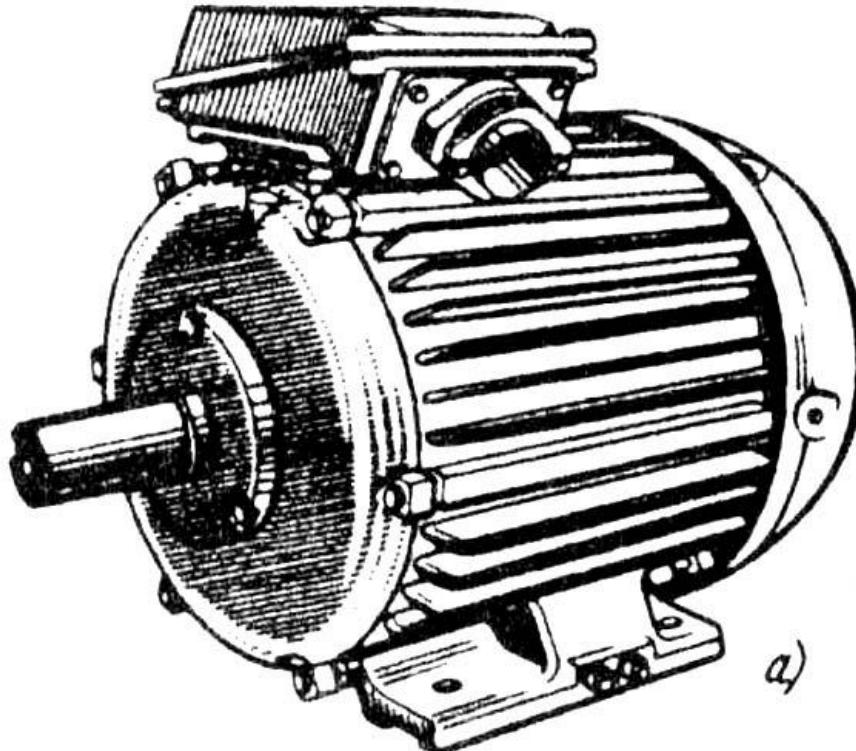
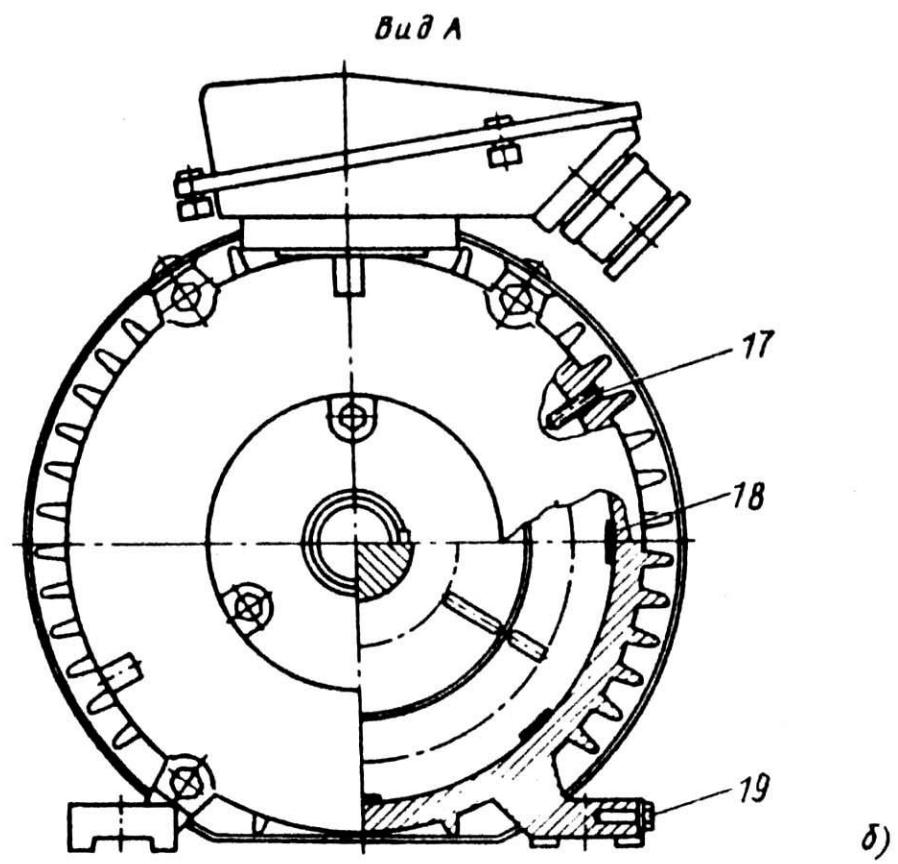
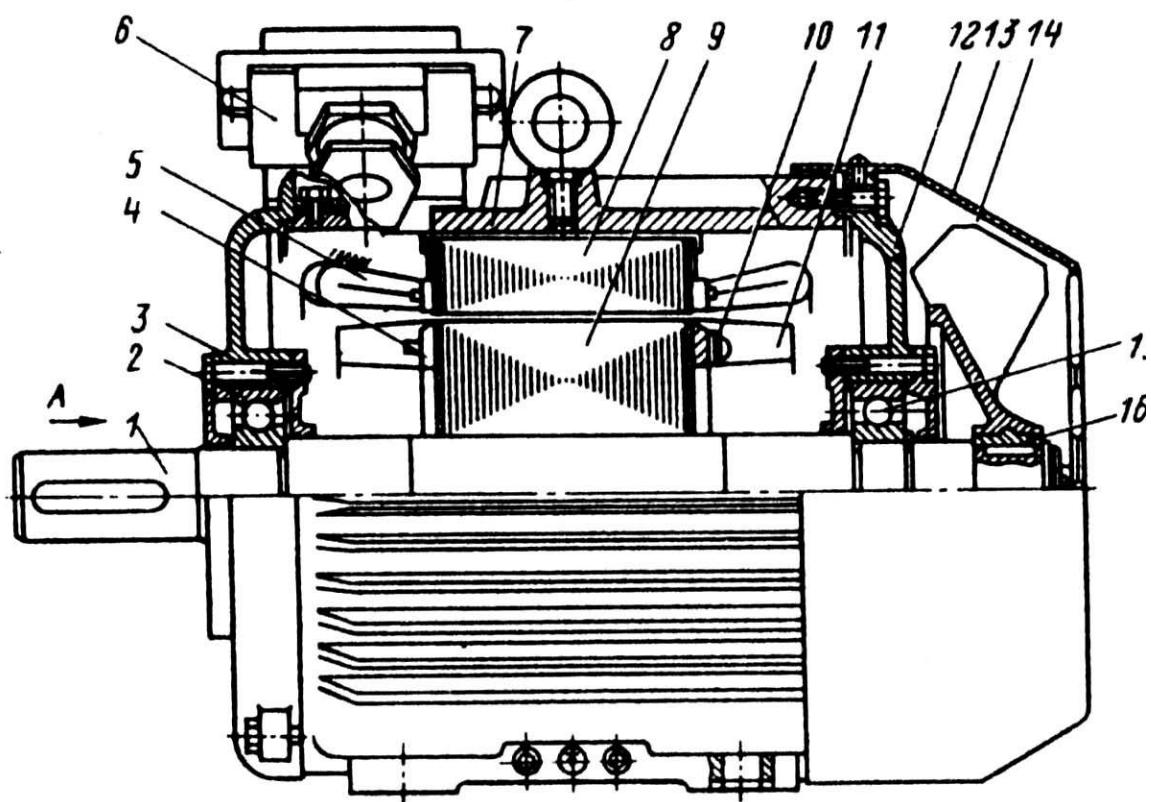


Рис. 9.7. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором со степенью защиты 1Р44(54), $h = 160$ мм, исполнение IM1001:

- а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы; 1 — вал; 2, 15 — подшипники;
3, 12 — подшипниковые шайбы; 4 — короткозамыкающие кольца ротора;
5 — лобовые части обмотки статора; 6 — коробка выводов; 7 — корпус;
8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора; 10 — балансировочные грузы;
11 — вентиляционные лопатки ротора; 13 — кожух вентилятора; 14 — вентилятор;
16 — втулки вентилятора; 17 — стопорные винты;
18 — скобы крепления сердечника статора; 19 — болты заземления



Сердечник статора запрессован непосредственно в корпус.

Во всех двигателях серии с $h < 280$ мм и в двигателях с $2p = 10$ и 12 всех высот оси вращения обмотка статора выполнены из круглого провода и пазы статора полуузакрытые. При $h = 280\ldots355$ мм, кроме двигателей с $2p = 10$ и 12 , катушки обмотки статора намотаны прямоугольным проводом, подразделенные и пазы статора полуоткрыты.

Сердечник ротора напрессован непосредственно на вал без промежуточной втулки, в двигателях с $h \leq 250$ мм — на гладкий вал. В двигателях с большей высотой оси вращения он крепится на валу с помощью шпонки.

Обмотка короткозамкнутого ротора лопатки и кольца — литые из алюминия. Вентиляционные лопатки на кольцах ротора служат для перемешивания воздуха, находящегося внутри машины. Этим обеспечивается перенос тепла, выделяющегося в обмотке ротора и лобовой части обмотки статора, к внутренним поверхностям корпуса и подшипниковых щитов, которые охлаждаются наружным воздухом с помощью внешнего вентилятора.

Подшипниковые щиты крепят к корпусу с помощью четырех или шести болтов. Допуски на обработку поверхностей посадки щитов в станину обеспечивают необходимую точность центровки ротора относительно статора и, следовательно, точность размера воздушного зазора двигателя.

Коробка выводов расположена сверху станины, что облегчает монтажные работы при соединении двигателя с сетью.

В двигателях исполнения по степени защиты IP23 с высотой оси вращения $160\ldots250$ мм (рис. 9.8) корпус гладкий, без наружных ребер. Сердечник статора крепится на внутренние продольные ребра корпуса таким образом, что между наружной поверхностью сердечника и

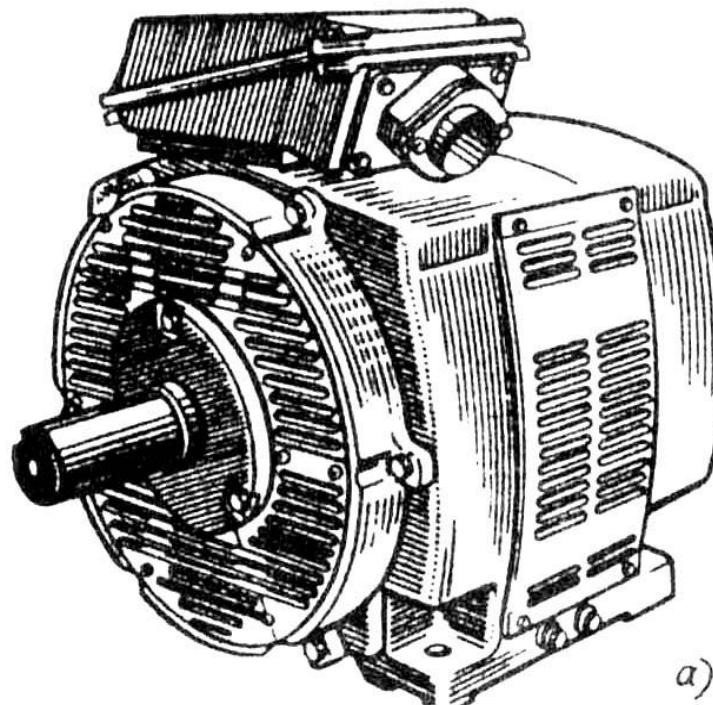
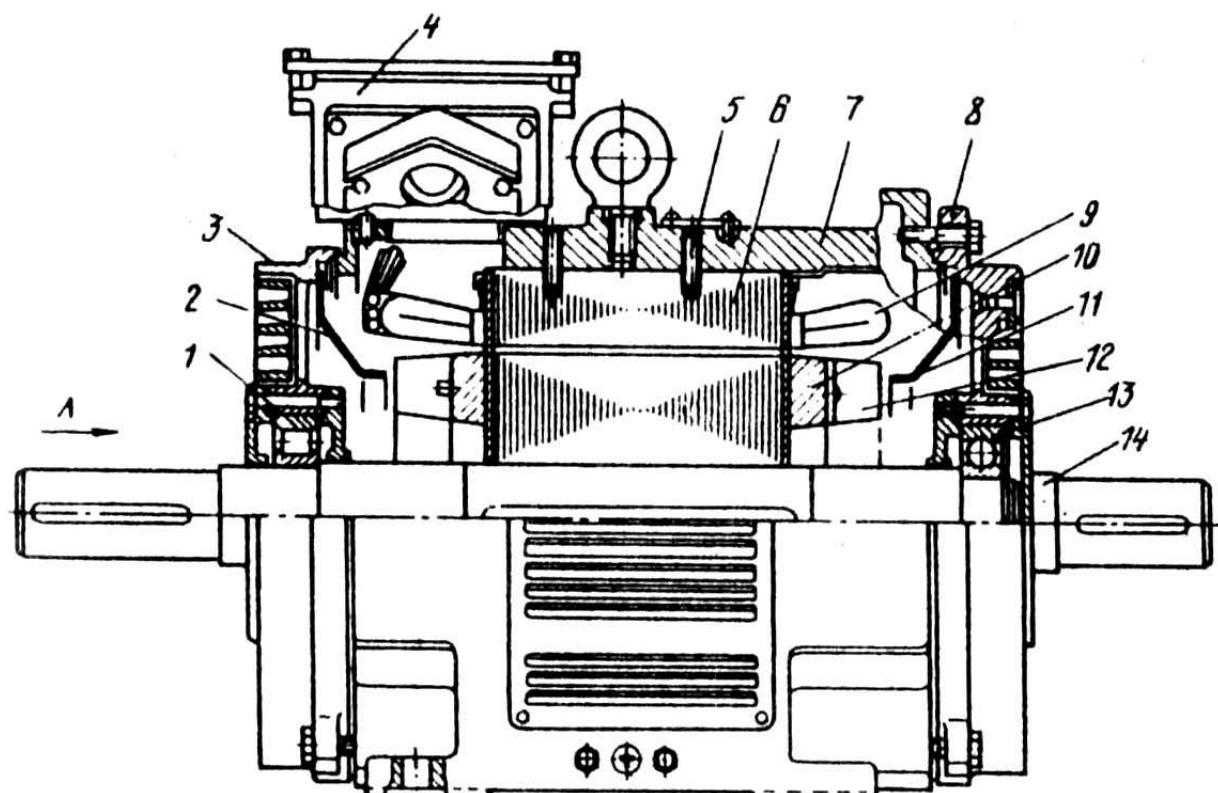


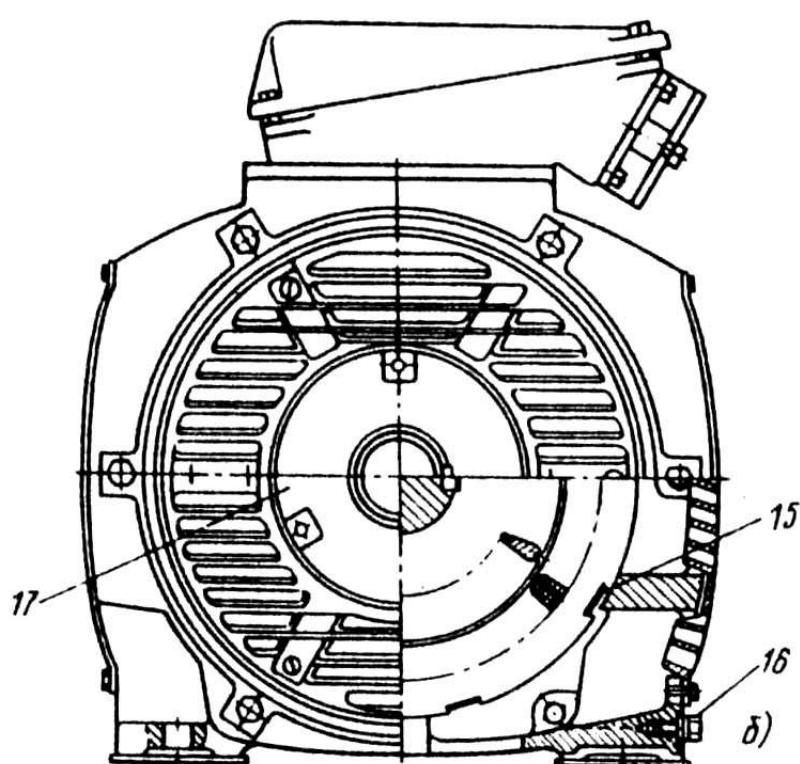
Рис. 9.8. Двигатель серии 4А с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23:

а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы; 1, 13 — подшипники; 2, 11 — диффузоры; 3, 8 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов; 5 — стопорный винт; 6 — сердечник статора; 7 — корпус; 9 — лобовые части обмотки статора; 10 — короткозамыкающее кольцо обмотки ротора; 12 — вентиляционные лопатки; 14 — вал; 15 — скобы крепления сердечника статора; 16 — болт заземления; 17 — подшипниковая крышка

корпусом образуются каналы для прохода охлаждающего воздуха. Охлаждение двигателей — радиальное двустороннее. Охлаждающий воздух проходит внутрь корпуса через жалюзи в подшипниковых щитах и направляется диффузорами на вентиляционные лопатки, отлитые вместе с обмоткой и замыкающими кольцами статора. Вентиляционные лопатки отбрасывают воздух на лобовые части обмотки статора. Далее воздух омывает наружную поверхность сердечника статора и выбрасывается через жалюзи, расположенные по бокам в нижней части корпуса.



вид А



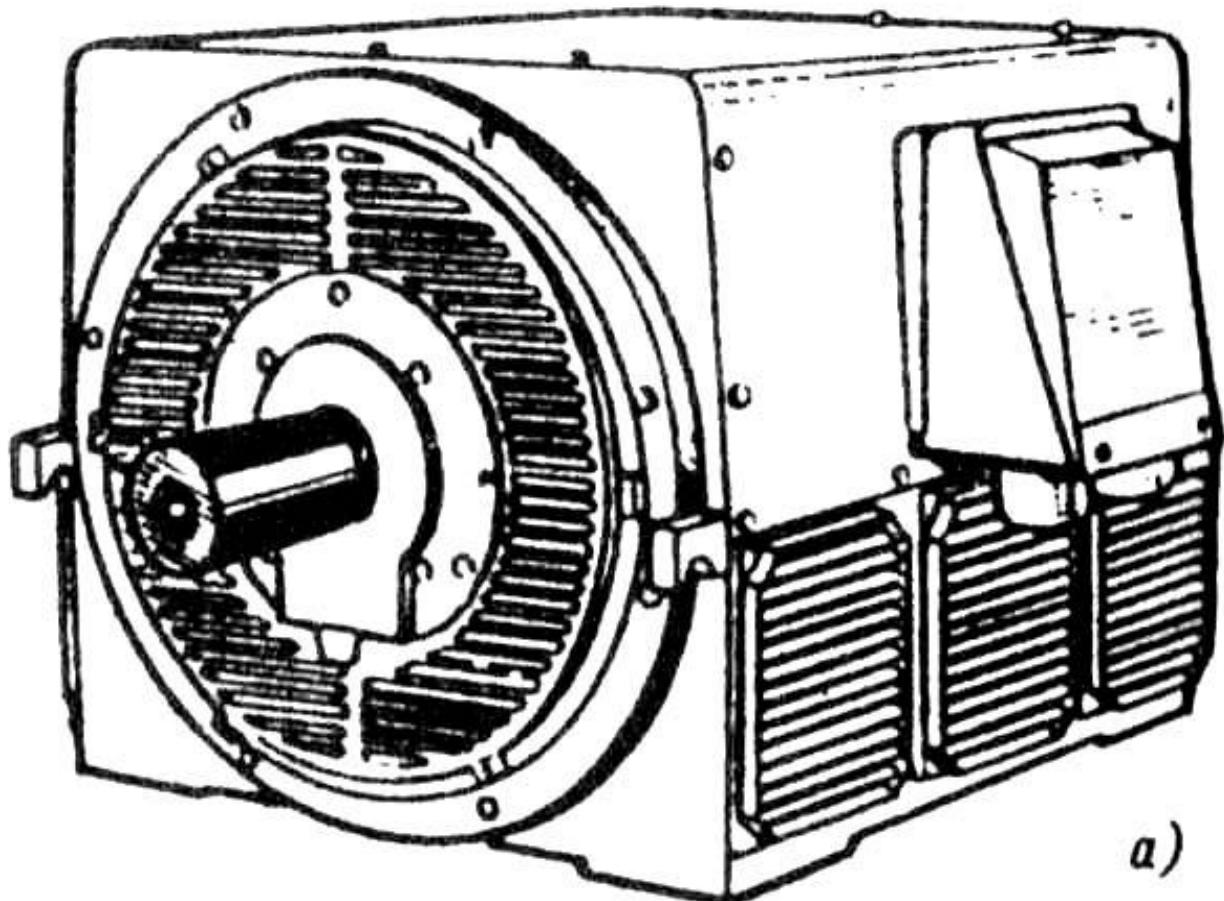
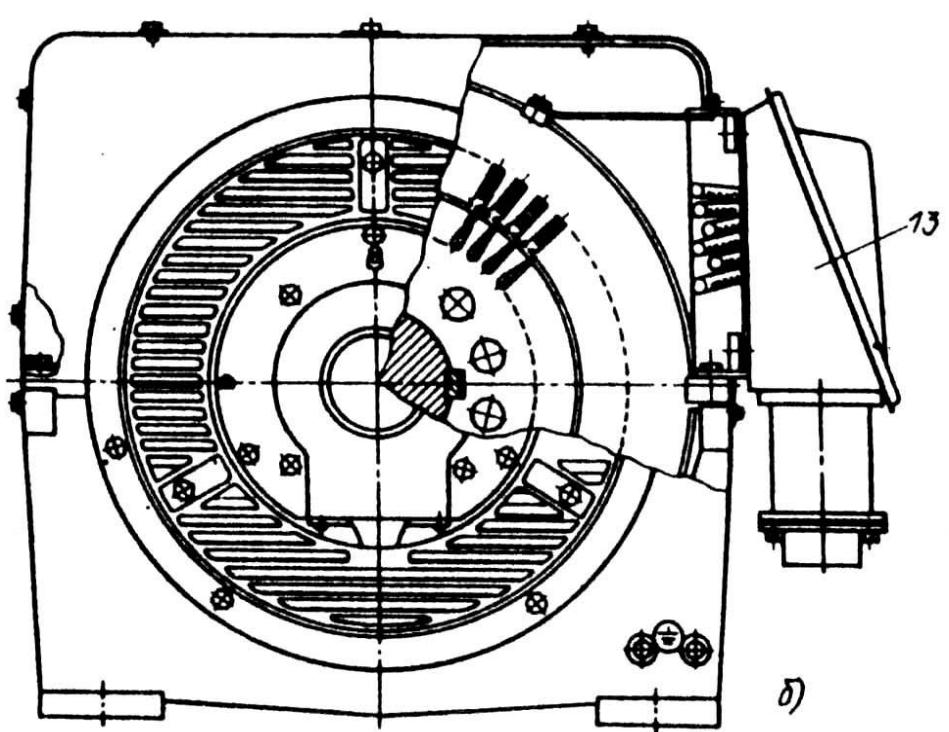
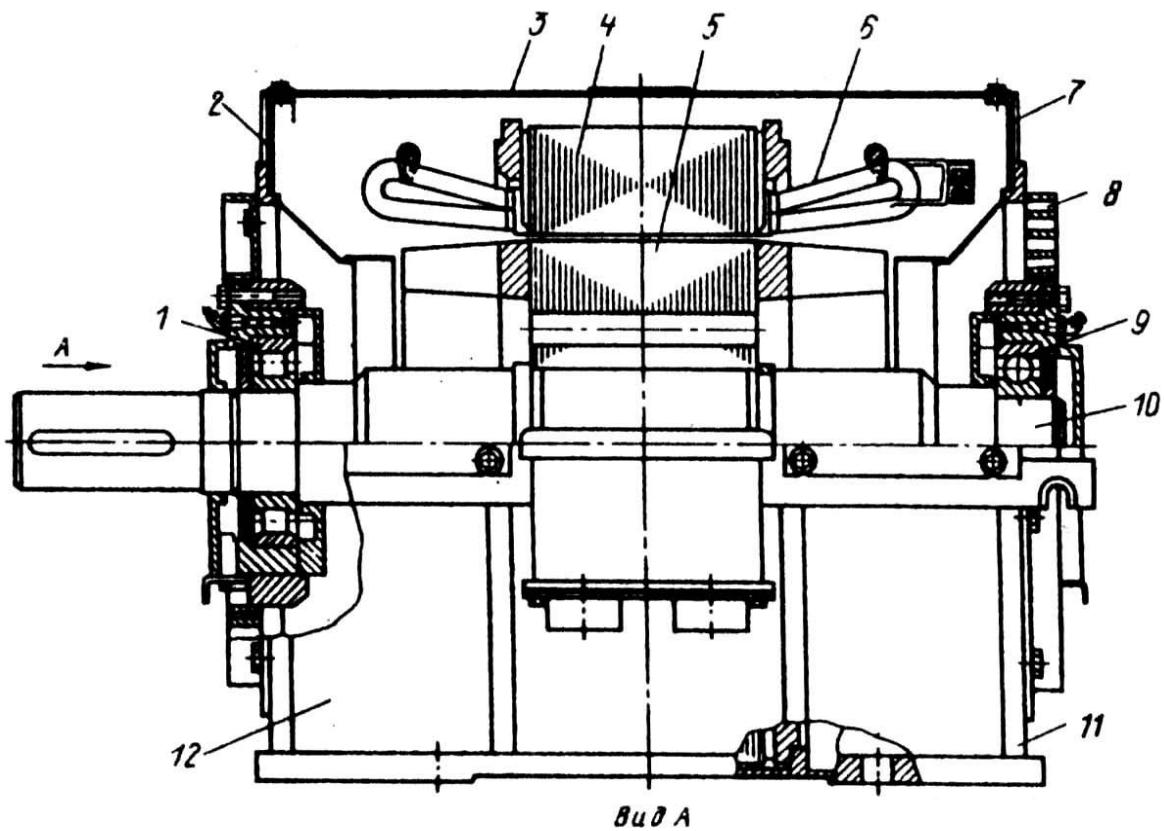


Рис. 9.9. Конструкция асинхронных двигателей серии 4А и АИ
с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23, A=280...335 мм:
а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы; 1,9 — подшипники;
2,7 — подшипниковые щиты; 3 — кожух двигателя; 4 — сердечник статора;
5 — сердечник ротора; 6 — лобовые части обмотки статора; 8 — торцевые жалюзи;
10 — вал; 11 — стойки корпуса; 12 — полустанина; 13 — коробка выводов



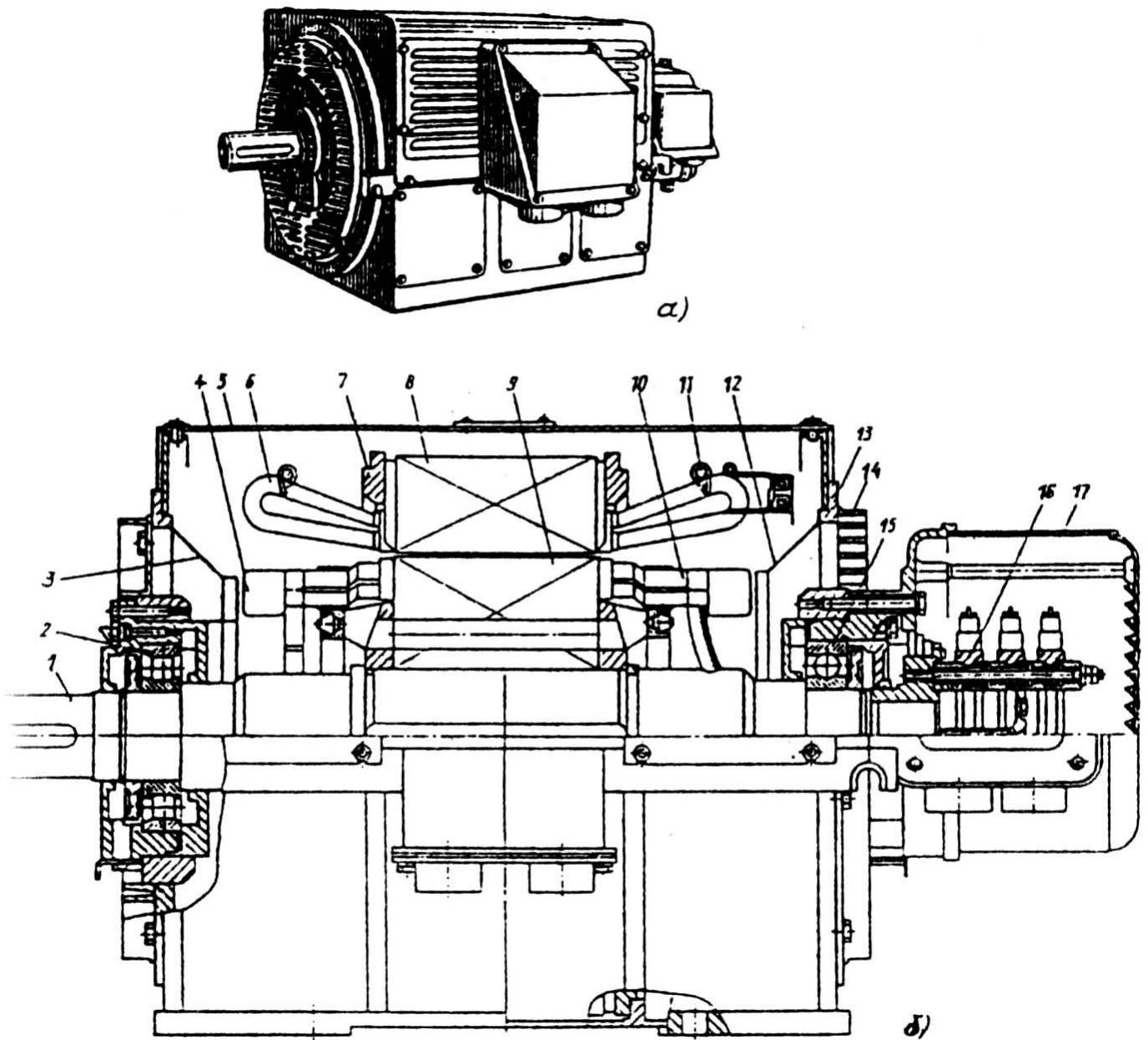


Рис. 9.10. Конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором серии 4А со степенью защиты IP23, $h = 280\ldots355$ мм:

- а — общий вид; б — продольный разрез; 1 — вал; 2, 15 — подшипники;
- 3, 12 — диффузоры; 4 — вентиляционные лопатки; 5 — кожух;
- 6 — лобовые части обмотки статора; 7 — нажимные кольца статора;
- 8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора; 10 — лобовые части обмотки ротора;
- 11 — бандажное кольцо обмотки статора; 13 — подшипниковый щит;
- 14 — торцевые жалюзи; 16 — контактные кольца; 17 — кожух контактных колец

Двигатели исполнения по степени защиты IP23 с высотой оси вращения 280…355 мм имеют отличную от рассмотренных выше конструкцию корпуса (рис. 9.9). Сварная из стального проката станина (полустанина) охватывает только нижнюю половину сердечника статора. К ней же крепят подшипниковые щиты. Верхняя часть корпуса выполнена штамповкой из листовой стали. Охлаждение двигателей — двустороннее радиальное. В связи с отказом от цельной станины существенно уменьшилась общая масса двигателя, а выполнение корпуса в виде параллелограмма вместо традиционной для электрических машин цилиндрической формы

позволило улучшить условия охлаждения двигателей без увеличения их габаритных размеров. В короткозамкнутых роторах двигателей с $h \geq 280$ мм выполняют закрытые пазы, в двигателях с $2p \geq 4$ — трапецидальные, сужающиеся к верхней части, при $2p = 2$ — лопаточные.

В фазных роторах (рис. 9.10), при прямоугольных, с малым раскрытием пазов, выполняют стержневую волновую обмотку. Выводные концы обмотки ротора проходят к контактным кольцам через внутреннее отверстие вала. Контактные кольца запрессовывают в пластмассу и крепят консольно к торцу вала. Весь щеточный узел закрыт кожухом из листовой стали. В середине 80-х гг. XX в. некоторые типоразмеры двигателей серии 4А модернизированы в целях повышения их энергетических показателей и надежности. Были несколько изменены размерные соотношения магнитопровода и обмоточные данные. В обозначении модернизированных двигателей после названия серии проставляется буква М — двигатели серии 4AM. Остальная индексация и цифры в условном обозначении остались прежними. Основные элементы конструкции двигателей серии 4AM, их установочно-присоединительные размеры и шкала мощностей остались такими же, как в серии 4A [15].

9.3. ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АИ и АИР

Серия асинхронных двигателей АИ разработана в 80-х гг. XX в. В ее разработке принимали участие многие страны-члены СЭВ, входящие в организацию «Интерэлектро», что отражено в названии серии АИ Асинхронные Интерэлектро. Для того чтобы двигатели были конкурентоспособны за рубежом, их качество и энергетические показатели должны находиться на уровне лучших зарубежных образцов. Кроме того, двигатели, выпускаемые в разных странах и разными фирмами, должны быть взаимозаменяемыми. Это возможно лишь в том случае, если ряды мощностей и установочно-присоединительных размеров серии, а также взаимная увязка их размеров и мощности будут одинаковы.

Благодаря тщательной подготовке производства и длительной конструкторско-технологической разработке, проводившейся в рамках «Интерэлектро», двигатели серии АИ по качеству и энергетическим показателям находятся на уровне лучших серийных двигателей, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, а по массогабаритным показателям во многих типоразмерах превосходят их. При разработке серии приняты общие для двигателей большинства зарубежных стран шкалы мощностей и высот оси вращения, рекомендованные Международной электротехнической комиссией (МЭК). Вопрос об унификации взаимной увязки мощности двигателей и их установочно-присоединительных размеров (высоты оси вращения) остался окончательно не решенным. В настоящее время в мире существуют три системы увязки: принятая стандартом США (стандарт NEMA), принятая в стандартах большинства западноевропейских стран (CENELEC) и увязка, согласованная странами — участниками «Интерэлектро» (документ РС-3031) и отраженная в национальных стандартах других стран. В серии АИ принята увязка мощностей с высотой оси вращения, рекомендованная этим документом, однако для поставок на экспорт двигатели выпускают с увязкой, соответствующей стандартам CENELEC. В связи с этим двигатели серии АИ имеют разное обозначение: двигатели для внутрироссийских поставок (уязка соответствующая РС-3031) обозначаются АИР, а двигатели, посыпаемые на экспорт (уязка, соответствующая CENELEC), — АИС (табл. 9.4 и 9.5).

**Т а б л и ц а 9.4. Увязка мощности и высоты оси вращения
двигателей серии АИ, исполнение по степени защиты IP54**

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2р									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
45	A	0,04	0,025	—	—	—	—	—	—	—	—
	B	0,06	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—
50	A	0,09	0,06	—	—	—	—	—	—	—	—
	B	0,12	0,09	—	—	—	—	—	—	—	—
56	A	0,18	0,12	—	—	—	—	0,09	0,06	—	—
	B	0,25	0,18	—	—	—	—	0,12	0,09	—	—
63	A	0,37	0,25	0,18	—	—	—	0,18	0,12	0,06	—
	B	0,55	0,37	0,25	—	—	—	0,25	0,18	0,09	—
71	A	0,75	0,55	0,37	—	—	—	0,37	0,25	0,18	0,09
	B	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—	0,55	0,37	0,25	0,12
80	A	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—	0,75	0,55	0,37	0,18
	B	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—	1,1	0,75	0,55	0,25
90	S	—	—	—	—	—	—	1,5	1,1	0,75	0,37
	L	3,0	2,2	1,5	0,75	—	—	2,2	1,5	1,1	0,55
100	S	4	3	—	—	—	—	—	—	—	—
	L	5,5	4	2,2	1,5	—	—	3	2,2;	1,5	—
112	M	7,5	5,5	3;4	2,2; 3	—	—	4	4	2,2	1,5
132	S	—	7,5	5,5	4	—	—	5,5	5,5	3	2,2
160	M	11	11	7,5	5,5	—	—	—	7,5	4; 5,5	3
	S	15	15	11	7,5	—	—	—	—	—	—
	M	18,5	18,5	15	11	—	—	11	11	7,5	4; 5,5
180	L	—	—	—	—	—	—	18,5	15	11	7,5
	S	22	22	—	—	—	—	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15	—	—	22	18,5	—	—
200	L	—	—	—	—	—	—	—	22	15	11
	M	37	37	22	18,5	—	—	—	—	—	15
	L	45	45	30	22	—	—	37	30	18,5	22
225	S	—	—	—	—	—	—	—	37	—	18,5
250	M	55	55	37	30	—	—	45	45	30	22
280	S	75	75	45	37	22	—	—	—	—	—
	M	90	90	55	45	30	—	55	55	37	30
315	S	110	110	75	55	37	—	75	75	45	37
	M	132	132	90	75	45	—	90	90	55	45
355	S	160	160	110	90	55	45	110	110	75	55
	M	200	200	132	110	75	55	132	132	90	75
	S	250	250	160	132	90	74	—	—	—	—
	M	315	315	200	160	110	90	—	—	—	—

Таблица 9.5. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей

серии АИ, исполнение по степени защиты IP23

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2р									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
200	M	55	45	30	22	—	—	45	37	22	18,5
	L	75	55	37	30	—	—	55	45	30	22
225	M	90	74	45	37	—	—	75	55	37	30
250	S	110	90	55	45	—	—	90	75	45	37
	M	132	110	75	55	—	—	110	90	55	45
280	S	160	132	90	75	—	—	—	110	75	55
	M	200	160	110	90	—	—	132	132	90	75
315	S	—	200	132	110	75	55	160	160	110	90
	M	250	250	160	132	90	75	200	200	132	110
355	S	315	325	200	160	110	90	250	250	160	132
	M	400	250	250	200	132	110	315	315	200	160

Анализ данных табл. 9.4 и 9.5 показывает, что двигатели АИР почти по всей шкале мощностей выпускаются с высотой оси вращения, на одну ступень меньшей, чем двигатели АИС. Размеры активной части двигателей, изготовленных по варианту Р или С (двигатели АИР и АИС), в большинстве типоразмеров одинаковы. Увеличение высоты оси вращения в двигателях АИС исполнения IM1001 достигается за счет увеличения высоты лап.

Двигатели серии АИР предназначены для привода вновь вводимою оборудования и замены двигателей серии 4А и модернизированной серии 4АМ на установленном оборудовании.

По варианту Р двигатели мощностью от 0,025 до 0,37 кВт выпускают на номинальное напряжение 220 и 380 В, мощностью от 0,55 до 11 кВ — на напряжение 220, 380 или 660 В. Во всех этих двигателях обмотка статора соединена в звезду или в треугольник внутри корпуса и имеет три выводных конца, подведенных к коробке выводов. Двигатели мощностью более 11 кВт изготавливают с шестью выводными концами обмотки статора, причем при мощности 15...110 кВт — на напряжение 220/380 В и при мощности 132 кВт и более — на напряжение 380/660 В. По заказу потребителей все двигатели серии могут быть изготовлены с шестью выводными концами обмотки статора и на другие напряжения.

Отдельные отрезки серии выпускают в следующих конструктивных исполнениях по способу монтажа (по ГОСТ):

Высота оси вращения h, мм	Исполнение по способу монтажа
200—350	IM1001
45—250	IM1081; IM2081
280—355	IM1001, IM2001
45—112	IM2181
45—180	IM3001, IM3011, IM3031
200—280	IM3011, IM3031
45—112	IM3601, IM3611, IM3631
45—250	IM5010

Структура обозначений двигателей серии АИ аналогична принятой для серии 4А, однако имеет некоторое отличие в индексации.

Различают обозначения базовое, основное и полное. В базовом обозначении буквами и цифрами указывают название серии, вариант привязки мощности к высоте оси вращения, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и магнитопровода и число полюсов. Основное обозначение содержит, кроме того, указания вида защиты и охлаждения двигателя, той или иной его модификации и вида исполнения по условиям окружающей среды. В полном обозначении эти сведения дополняются электрическими и конструктивными характеристиками данного двигателя, например указанием номинального напряжения,

конструктивного исполнения по способу монтажа, исполнения конца вала, выводного устройства и т. п.

Приведем расшифровку основного обозначения двигателей:

AI X X X X X X X X
1 2 3 4 5 6 7 8

Буквы и цифры в порядке следования их в условном обозначении обозначают следующее:

- 1 — название серии;
- 2 — вариант увязки мощности с высотой оси вращения (Р или С);
- 3 — буквы, обозначающие исполнение по степени защиты от влияния окружающей среды, вид охлаждения, ту или иную электрическую модификацию;
- 4 — высота оси вращения, мм;
- 5 — буквы, указывающие установочный размер по длине станины и сердечника, соответственно S, M, L и A, B, C;
- 6 — число полюсов двигателя;
- 7 — буквы, обозначающие конструктивную модификацию;
- 8 — исполнение по условиям окружающей среды и категория размещения.

Для двигателей основного исполнения — на частоту питания 50 Гц, закрытых, с внешним обдувом (IP54), с короткозамкнутым ротором, предназначенных для эксплуатации в нормальных условиях в продолжительном режиме, — буквы в позициях 3 и 7 не пропускаются.

Значения остальных символов обозначения приведены ниже:

Вид исполнения, модификация	Условное обозначение, буквы	
	русские	латинские
Исполнение по виду защиты и охлаждения		
Закрытое с внешним обдувом корпуса со встроенным вентилятором		Не указывается
Закрытое с естественным охлаждением	Б	В
Защищенное	Н	Н
Открытое	Л	Л
Закрытое продуваемое	П	Р
С пристроенным вентилятором отдельного двигателя (принудительное охлаждение)	Ф	Ф
Электрические модификации		
С повышенным скольжением	С	С
С повышенным пусковым моментом	Р	Р
С регулируемой частотой вращения	Х	Х
С фазным ротором	К	К
Для кратковременного режима работы	Кр	K _R
Конструктивные модификации		
С температурной защитой	Б	В
Малошумные	Н	Н
С повышенной точностью установочных размеров	П	Р
С высокой точностью установочных размеров	П2	P2
Со встроенным электромагнитным тормозом	Е	Е
Встраиваемые	В	В

Примеры обозначения двигателей:

АИСН200М4Т2 — асинхронный двигатель серии АИ, увязка мощности по варианту С, Н — защищенного исполнения (IP23), высота оси вращения 200 мм, М — вторая длина корпуса по установочным размерам, четырехполюсный, Т2 — тропического исполнения;

АИРБР9084НПУ3 — асинхронный двигатель серии АИ, увязка мощности по варианту Р (для внутренних поставок), Б — закрытое исполнение с естественной вентиляцией без

обдува, Р — с повышенным пусковым моментом, высота оси 90 мм, С — первая типа корпуса по установочным размерам, четырехполюсный, Н — малошумный, П — с повышенной точностью установочных размеров, УЗ — для умеренного климата, категория размещения 3.

Закрытые обдуваемые двигатели серии имеют исполнение по степени защиты от окружающей среды IP54, которое предусматривает, что двигатели защищены от попадания пыли внутрь корпуса в количестве, достаточном для нарушения его работы (цифра 5), и вода, разбрызгиваемая на оболочку двигателя с любой стороны, не оказывает вредного влияния на его работу (цифра 4). Общей конструктивной схемой двигателей исполнения по степени защиты IP54 является оребренный корпус (станина) с обдувом от наружного вентилятора, установленного на противоположном от рабочего конце вала, и сердечник ротора, непосредственно насаженный на вал, с обмоткой, выполненной заливкой пазов алюминием.

Магнитопроводы двигателей выполнены из холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем двигатели с $h = 45\ldots63$ мм — из стали марки 2013, с $h = 71\ldots160$ мм — марки 2214, с $h = 160\ldots250$ мм — марки 2212 или 2214 и с $h = 280\ldots355$ мм — из стали марки 2312 или 2412.

Отдельные элементы конструкции двигателей несколько отличаются в зависимости от высоты оси вращения.

Двигатели с $h = 45\ldots112$ мм (рис. 9.11) имеют литые из высокопрочного алюминиевого сплава корпуса с горизонтально-вертикальным оребрением. Такая конструкция позволяет использовать для отливки четырехразъемные пресс-формы, что существенно упрощает технологию их изготовления. Корпуса отливают с лапами

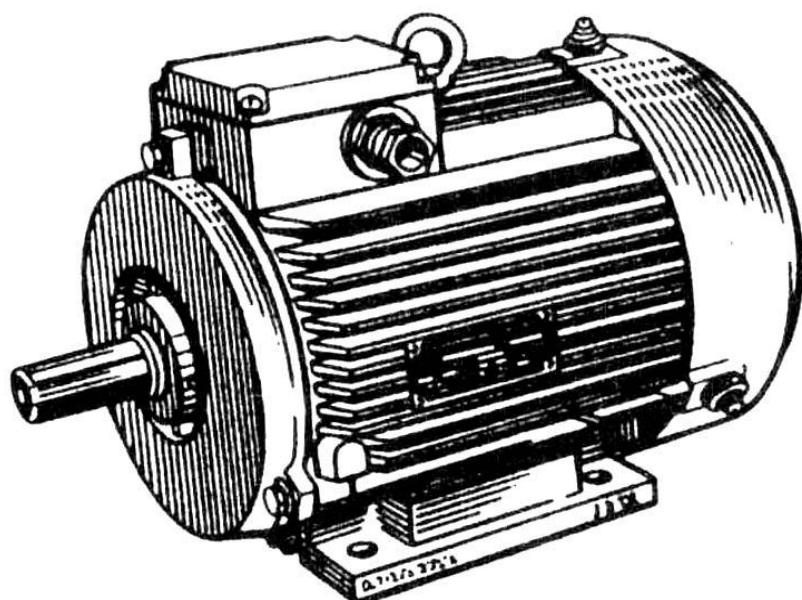


Рис. 9.11. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, $h = 100$ мм

для крепления к фундаментной плите и основанием коробки выводов. Подшипниковые щиты двигателей с высотой оси вращения до 63 мм также выполняют из алюминия. Они имеют наружные ребра для улучшения охлаждения. Сердечники статоров после опрессовки скрепляют несколькими швами сварки по наружной поверхности по длине сердечника. Наружные вентиляторы выполняют из высокопрочной и термостойкой пластмассы и защищают кожухом из того же материала.

Корпуса двигателей с $h = 132\ldots180$ мм мало отличаются от корпусов соответствующих двигателей серии 4А (см. рис. 9.7). Они выполняются либо из сплава алюминия с вертикально-

горизонтальным оребрением, либо из чугуна с радиальным оребрением. По мере совершенствования технологии литья чугунные корпуса двигателей выполняются также с горизонтально-вертикальным оребрением, при этом массу чугунных отливок удается снизить на 15...25 %. Подшипниковые щиты — чугунные без охлаждающих ребер. Вентиляторы из пластмассы выполняют только для двигателей с $h = 132$ мм. У двигателей с большей высотой оси вращения вентиляторы отливают из алюминиевого сплава на чугунную втулку для посадки на вал. Кожухи вентиляторов — штампованные из листовой стали. Сердечники статоров у всех двигателей с $h \geq 132$ мм скреплены скобами, которые привариваются в нескольких местах к наружной поверхности сердечника.

Двигатели с $h = 200\text{...}250$ мм (рис. 9.12) выпускают с чугунными литыми корпусами и подшипниками щитами. Оребрение корпусов радиальное. Подшипниковые щиты имеют внутренние ребра, к которым крепят диффузоры, создающие направленный поток воздуха, заключенного в корпусе двигателя.

Корпуса двигателей с высотой оси вращения $h = 280\text{...}355$ мм по своей конструкции резко отличаются от рассмотренных выше (рис. 9.13). Их выполняют из гофрированной рулонной стали толщиной 2...2,5 мм, что уменьшает их массу по сравнению с литыми из чугуна примерно в 2,8 раза. Подшипниковые щиты в двигателях чугунные. Лапы для крепления к фундаменту прикреплены к корпусу сваркой либо болтами.

Обмотка статора всех двигателей с $h = 45\text{...}250$ мм и двигателей с $2p = 10$ и 12 , с $h = 280\text{...}355$ мм выполнена из круглого обмоточного провода (см. гл. 3). В двигателях меньших мощностей с $h = 45\text{...}132$ мм обмотка однослойная концентрическая, в ряде типоразмеров выполнена вразвалку; в двигателях с $h = 160\text{...}250$ мм — одно-двухслойная, а в многополюсных двигателях с $h = 280\text{...}355$ мм — двухслойная концентрическая. Таким образом, конструкция и схемы обмоток из круглого провода всех двигателей серии позволяют применять механизированные способы ее намотки.

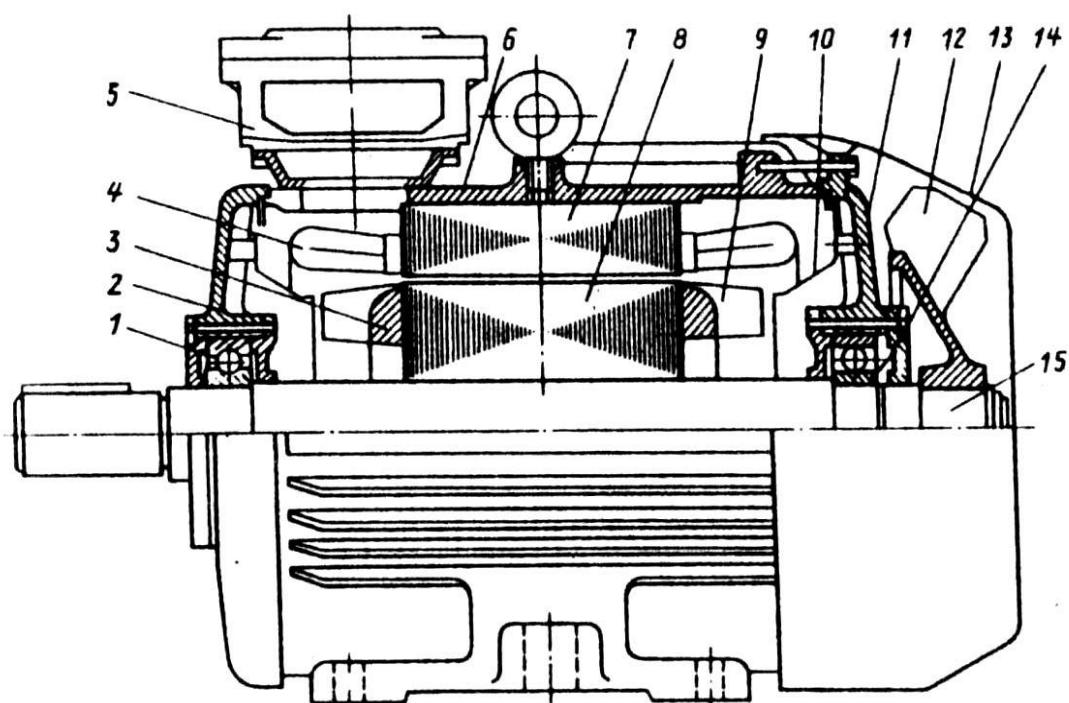


Рис. 9.12. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, $h = 225$ мм:

- 1, 14 — подшипники;
- 2, 11 — подшипниковые щиты;
- 3 — короткозамыкающее кольцо ротора;
- 4 — лобовые части обмотки статора;
- 5 — коробка выводов;
- 6 — корпус;
- 7 — сердечник статора;

8 — сердечник ротора; 9 — вентиляционные лопатки ротора;
10 — диффузоры; 12 — вентилятор; 13 — кожух вентилятора;
15 — вал

Обмотка статора двигателей с $h = 280\ldots355$ мм (кроме 10- и 12-полюсных) выполнена из прямоугольного обмоточного провода, двухслойная из подразделенных катушек, что позволяет укладывать их в полуоткрытые пазы статора. Лобовые части обмотки укреплены бандажными кольцами. С помощью дистанционных прокладок между лобовыми частями катушек обмотки создаются промежутки для прохода охлаждающего воздуха.

Обмотки двигателей всех высот оси вращения выполнены проводом марки ПЭТМ-155 или ПЭТД-180. Для пазовой и межфазовой изоляций применяют материалы на основе фенолона, имеющие класс нагревостойкости F. Так как расчетный нагрев обмоток соответствует классу нагревостойкости B, то при таком решении повысилась надежность обмотки.

Обмотки короткозамкнутых роторов выполнены заливкой сплавом алюминия. Одновременно отливают и замыкающие кольца с вентиляционными лопатками. Для крепления балансировочных грузов в замыкающих кольцах роторов двигателей с $h \leq 200$ мм предусмотрены кольцевые канавки, а в двигателях с большей высотой оси вращения — штыри между вентиляционными лопатками.

Все двигатели исполнения по степени защиты IP54 охлаждаются с помощью наружного вентилятора, прогоняющего окружающий двигатель воздух вдоль ребер корпуса. Перенос тепла от обмотки статора и лобовых частей обмотки статора к внутренней поверхности и корпуса и подшипниковых щитов происходит за счет циркуляции воздуха, находящегося внутри корпуса. В двигателях с $h = 45\ldots180$ мм воздух перемешивается вентиляционными лопатками замыкающих колец. В двигателях с $h = 200\ldots250$ мм внутри корпуса вентиляционными лопатками создается направленная циркуляция воздуха. Для этого на внутренних ребрах подшипниковых щитов с обоих торцов сердечника ротора установлены диффузоры (см. рис. 9.12).

Диффузоры разделяют область пониженного давления — перед вентиляционными лопатками и повышенного давления — над лопатками. Воздух нагревается, соприкасаясь с замыкающими кольцами и вентиляционными лопатками ротора и лобовыми частями обмотки статора, проходит к внутренней поверхности корпуса, в полость между диффузором и внутренними ребрами подшипниковых щитов и отдает им тепло.

В двигателях с $h = 280\ldots355$ мм с гофрированным корпусом (см. рис. 9.13) схема охлаждения отличается от рассмотренной выше. В сердечниках роторов этих двигателей выполнены аксиальные вентиляционные каналы, а внутри корпуса установлен центробежный вентилятор. Внутренний вентилятор прогоняет нагретый от лобовых частей обмоток ротора и статора воздух в полости, образованные ребрами гофрированного корпуса и наружной поверхностью сердечника статора. В то же время наружный вентилятор направляет холодный воздух, окружающий двигатель, вдоль ребер снаружи корпуса. Этим достигается более интенсивное охлаждение воздуха, заключенного внутри корпуса. Охлажденный воздух поступает в аксиальные каналы ротора и вновь к лопаткам внутреннего вентилятора.

В защищенном исполнении двигатели с короткозамкнутым ротором выпускаются в диапазоне осей вращения от 200 до 355 мм со степенью защиты IP23. Корпуса и подшипниковые щиты двигателей несколько отличны по своей конструкции от двигателей исполнения IP54. Это связано с изменением системы вентиляции. Двигатели имеют двустороннюю радиальную систему вентиляции. Нагнетательными элементами служат вентиляционные лопатки на замыкающих кольцах. Как и в двигателях исполнения по степени защиты IP54, лопатки служат также радиаторами, отводящими тепло от пазовой части стержней обмотки ротора. В двигателях с $h = 200\ldots250$ мм (см. рис. 9.4) воздух засасывается через жалюзи в подшипниковых щитах торцов ротора, направляется диффузорами на

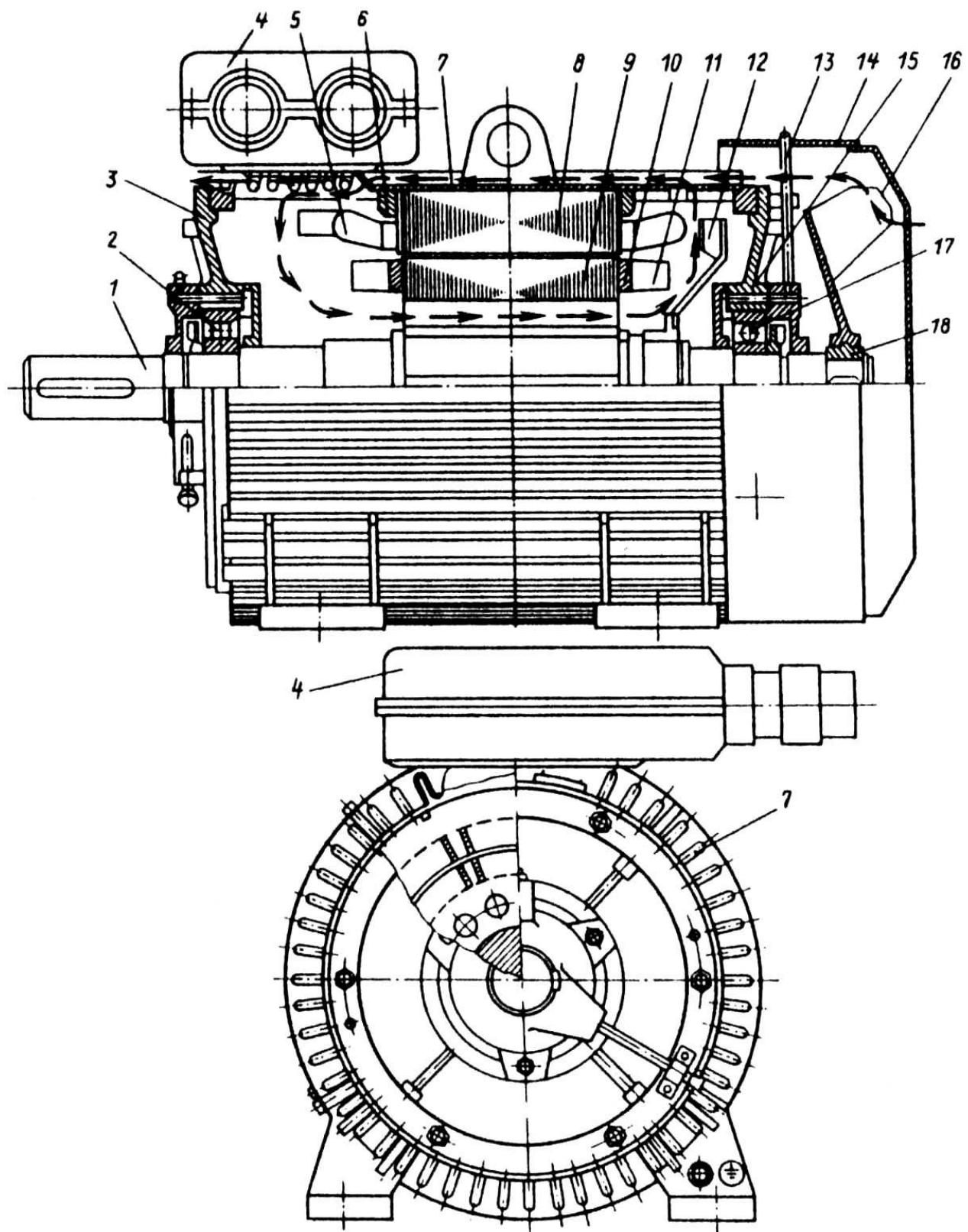


Рис. 9.13. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, h = 280 мм, с гофрированной станиной:

1 — вал; 2, 17 — подшипники; 3, 15 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов;

5 — лобовые части обмотки статора; 6 — нажимное кольцо статора;

7 — гофрированная станина; 8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора;

10 — короткозамыкающие кольца; 11 — вентиляционные лопатки;

12 — внутренний вентилятор; 13 — масленка для смазки подшипника;

14 — кожух вентилятора; 16 — наружный вентилятор;

18 — втулка вентилятора (стрелками показаны направления потоков охлаждающего воздуха)

вентиляционные лопатки ротора, охлаждает обмотку ротора и отбрасывается лопатками на лобовые части обмотки статора, обдувает внешнюю поверхность сердечника статора и выходит наружу через жалюзи в средней части корпуса двигателя. Корпуса двигателей этого отрезка серии отлиты из чугуна и внутри имеют продольные ребра, которые служат для установки сердечника статора. Сердечник закреплен на ребрах эксцентрично по отношению к корпусу, и площадь поперечного сечения вентиляционных каналов сверху сердечника больше, чем снизу. Корпуса двигателей с $h = 280\ldots355$ мм, так же как и в аналогичных двигателях серии 4А (см. рис. 9.9), состоят из сварной полустанины, выполненной из стального листа, и штампованного из листовой стали верхнего кожуха. На полустанине имеются четыре вертикальные стойки, соединенные с основанием продольными планками, а сверху между собой продольными ребрами. В кольцевых проточках боковых ребер располагаются подшипниковые щиты. Сердечник статора устанавливают нижней половиной на центрирующие заточки внутренних стоек и крепят с помощью массивных нажимных колец. Вентиляция двигателей — радиальная двусторонняя. Циркуляция охлаждающего воздуха имеет такую же схему, как в двигателях исполнения со степенью защиты IP23 меньших высот оси вращения.

Асинхронные двигатели с фазными роторами выпускают как модификации серии АИР (АИС) в диапазоне высот оси вращения 160…355 мм в исполнениях по степени защиты IP44 — АИРФ (АИСФ) и IP23 — АИРНФ. Обмотки фазных роторов двигателей мощностью до 50…60 кВт выполнены из круглого провода, двухслойные, равнокатушечные с укороченным шагом. Пазы ротора — трапециoidalные, полуузакрытые. В двигателях большей мощности обмотки стержневые волновые, пазы с параллельными стенками, полуузакрытые с узким шлицем. В пазовой части обмотка закреплена клиньями, в лобовой части — бандажами из стальной проволоки или нетканой (бандажной) стеклоленты.

Напряжение на кольцах ротора у большинства двигателей примерно равно линейному напряжению обмотки статора.

Двигатели с фазными роторами со степенью защиты IP54 имеют ребристый корпус и охлаждаются наружным вентилятором, как и двигатели с короткозамкнутыми роторами. Контактные кольца расположены внутри корпуса (рис. 9.14) в полости, отделенной от статора перегородкой с лабиринтными уплотнениями, предотвращающими попадание пыли от щеток на обмотки статора и ротора.

Контактные кольца двигателей исполнения IP23 с высотой оси вращения 160…200 мм (рис. 9.15) установлены на выступающем конце вала, противоположном рабочему, и закрыты кожухом с отверстиями для прохода охлаждающего воздуха. Контактные кольца с токоотводами запрессованы в пластмассу. В пластмассовой части колец (рис. 9.16, а) имеются отверстия для прохода охлаждающего воздуха и вентиляционные лопатки для засасывания воздуха в пространство между кольцами. Выводные концы обмотки ротора подходят к контактным кольцам через внутреннее отверстие на валу ротора.

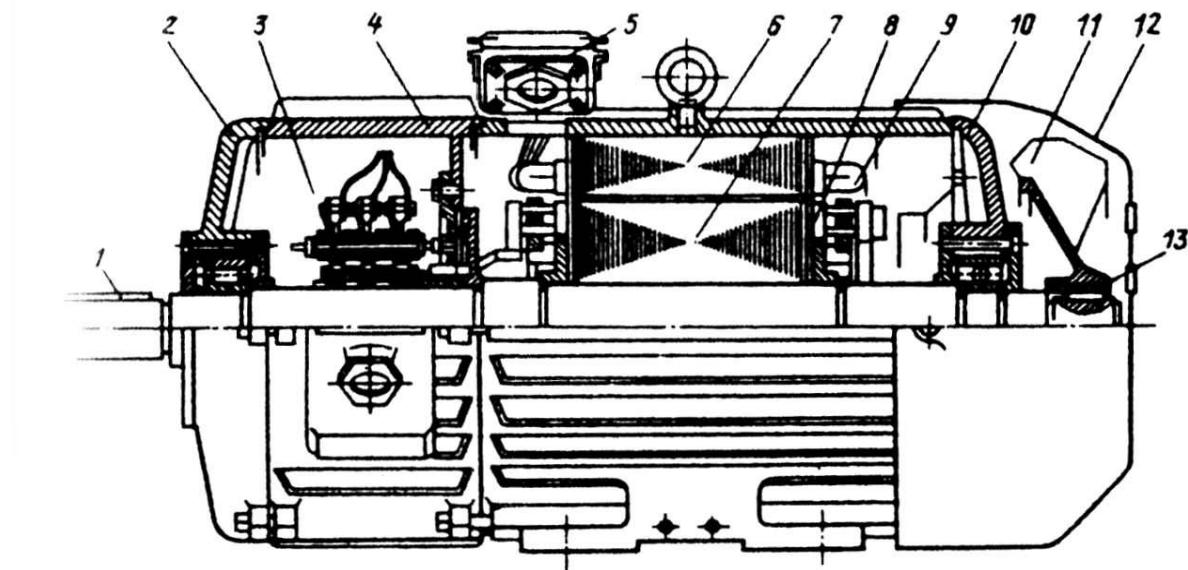


Рис. 9.14. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP54, $h=180$ мм:

1—вал; 2, 10 — подшипниковые щиты; 3 — контактные кольца; 4 — корпус; 5 — коробка выводов;
6 — сердечник статора; 7 — сердечник ротора; 8 — лобовые части обмотки ротора;
9 — лобовые части обмотки статора; 11 — вентилятор;
12 — кожух вентилятора; 13 — втулка вентилятора

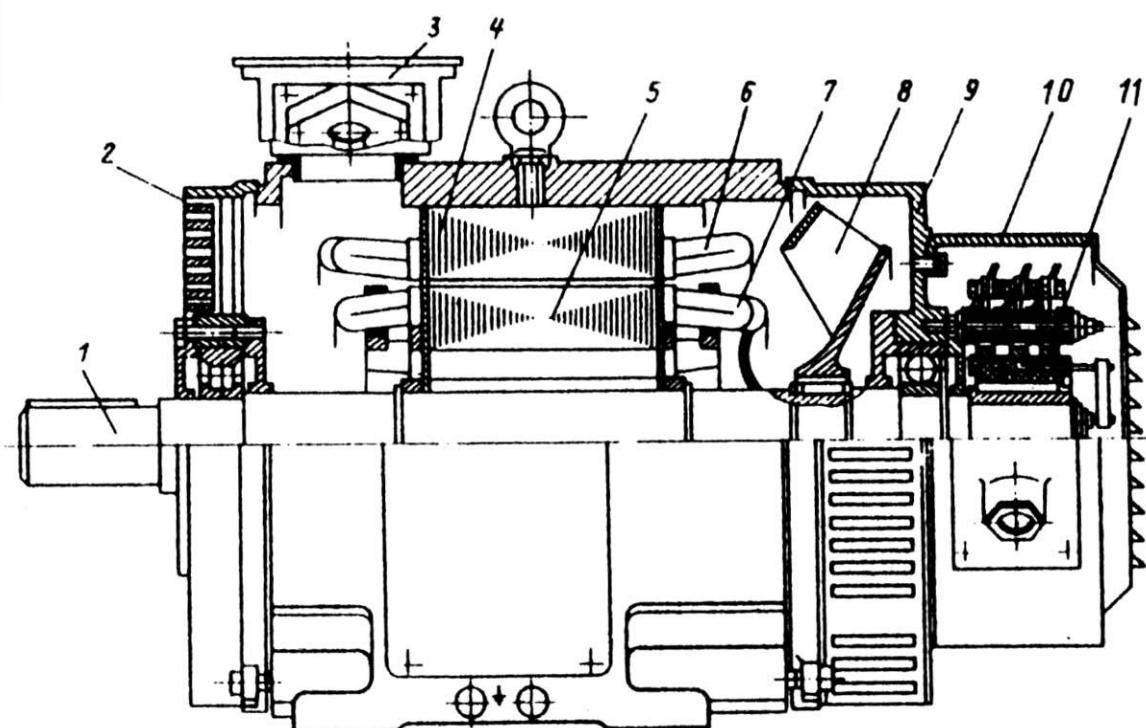


Рис. 9.15. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP23, $h=180$ мм, с аксиальнойной вентиляцией:

1 — вал; 2, 9 — подшипниковые щиты; 3 — коробка выводов; 4 — сердечник статора;
5 — сердечник ротора; 6 — лобовые части обмотки статора;
7 — лобовые части обмотки ротора; 8 — вентилятор;
10 — кожух контактных колец; 11 — контактные кольца

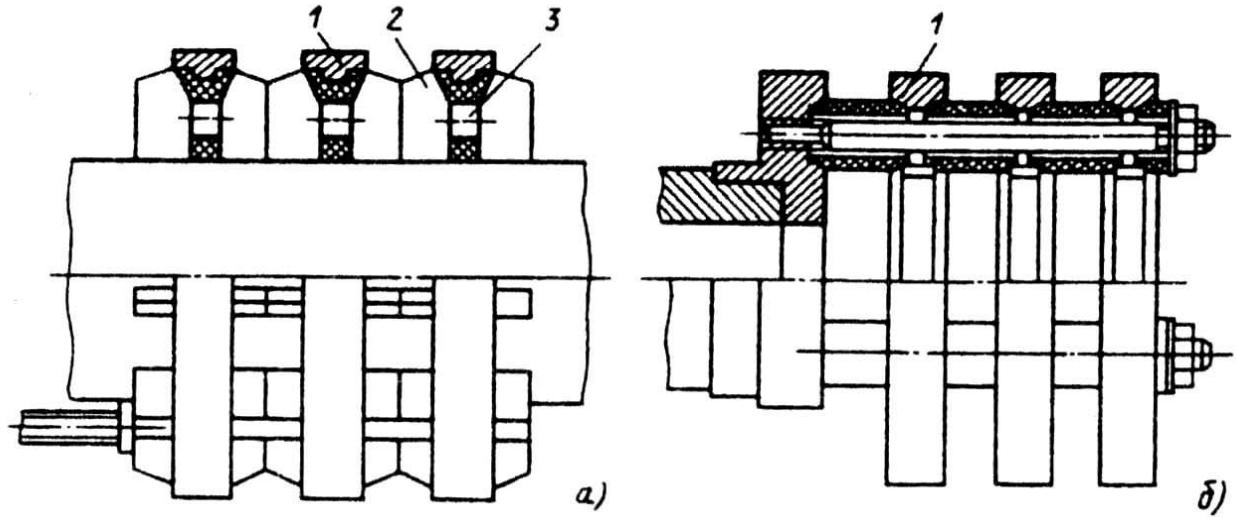


Рис. 9.16. Контактные кольца асинхронного двигателя с фазным ротором:
а — с посадкой на вал; б — консольное крепление; 1 — контактные кольца;
2 — вентиляционные лопатки; 3 — отверстия для прохода охлаждающего воздуха

Вентиляция двигателей — аксиальная. Центробежный вентилятор установлен рядом с сердечником ротора со стороны, противоположной рабочему концу вала. Охлаждающий воздух засасывается через жалюзи в подшипниковом щите, омывает лобовые части обмоток ротора и статора, наружную поверхность сердечника статора, лобовые части обмоток с другого торца сердечника и выбрасывается вентилятором через жалюзи в нижней части подшипникового щита. Часть воздуха проходит через аксиальные каналы в сердечнике статора и отводит тепло, выделяющееся в роторе.

В двигателях с $h = 255\ldots355$ мм (см. рис. 9.5) вентиляция — радиальная, двусторонняя. Роторные вентиляторы расположены с двух сторон сердечника ротора. Контактные кольца укреплены на выступающем конце вала и закрыты кожухом. В двигателях с $h = 280$ мм их крепят консольно к несущему фланцу, установленному на валу с помощью трех шпилек (рис. 9.16, б). Токоподводы к обмотке ротора проходят через центральное отверстие в валу.

Большинство двигателей других модификаций и специализированных исполнений серии АИ выпускают со степенью защиты IP54 в тех или иных диапазонах высоты оси вращения. Они отличаются от рассмотренных либо отдельными конструктивными элементами, например, встроенным электромагнитным тормозом, либо схемами обмоток (многоскоростные двигатели), материалом заливки пазов или размерными соотношениями зубцовой зоны (двигатели с повышенным скольжением или пусковым моментом), либо усиленными уплотнениями вала, подшипниковых щитов, вводного устройства, а также защитными и лакокрасочными покрытиями и т. п. (двигатели тропического или химического исполнения).

Кроме единых серий асинхронных двигателей общего назначения выпускается ряд серий двигателей специального назначения, например крановые двигатели серии МТ, взрывозащищенные серии 2ВР и др. Асинхронные двигатели малой мощности для ручного электрифицированного инструмента, бытовой техники и специализированные для различного вида автоматических систем выпускаются электротехнической промышленностью в массовом количестве [15].

Вопросы проектирования асинхронных двигателей общего назначения рассматриваются ниже, в основном, на базе общесоюзных серий АИ и 4А.

9.4. НОВАЯ СЕРИЯ РА

Разработка новой серии асинхронных машин Российские асинхронные (РА) на Ярославском электромашиностроительном заводе (ЯЭМЗ) началась в 1992 г. Если до распада СССР созданием единых общесоюзных серий занимались около десятков НИИ и разработка единой серии занимала несколько лет, то коллективу ЯЭМЗ пришлось создавать новую серию в течение одного года [11].

В новую серию были заложены решения, позволившие изготавливать двигатели для любых требований потребителя. Это удалось создать благодаря применению конструкции станины со съемными лапами, которые фиксируются по четырем направлениям. Применение съемных лап, хотя и увеличивает трудоемкость, но позволяет несколько исполнений машины объединить в одной конструкции (фланцевое В5, на лапах В3 и на лапах с фланцем В35). Это приводит к значительной экономии оборотных средств завода, а потребитель может заменить поврежденную лапу новой, в то же время в конструкциях с постоянно прилитыми лапами их поломка приводит к замене всего двигателя.

В серии РА станины для высот оси вращения 71...132 мм включительно — алюминиевые, получаемые экструзией, щиты также алюминиевые (рис. 9.17). Для высот оси вращения, больших 132 мм, станины и щиты выполняют чугунными. Все станины имеют горизонтально-вертикальное оребрение, что позволяет увеличить теплоотдачу при снижении массы двигателя,

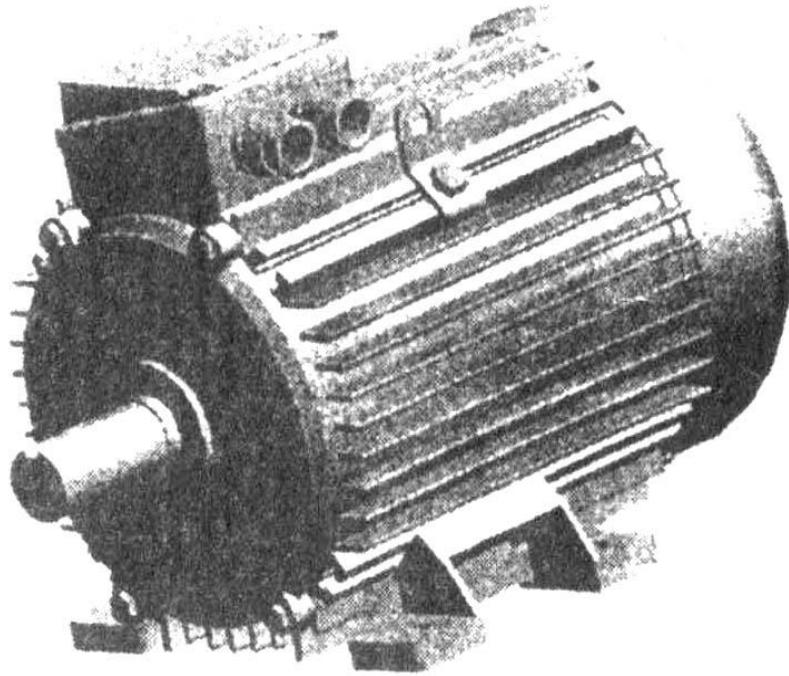


Рис. 9.17. Асинхронный двигатель новой серии РА

а также улучшает эстетичность его формы. Особенno этому способствует экструзионная станина (см. рис. 9.17).

Внутренний диаметр сердечника статора D_1 выбран так, что при фиксированном наружном диаметре D_{h1} оптимизирован весь ряд мощностей для нескольких высот оси вращения. Так, например, если для высот оси вращения 160 и 180 мм ($D_{h1} = 273$ мм) при полюсности $2p = 6$ выбран внутренний диаметр $D_1 = 185$ мм, то для последующего наружного диаметра 296 мм (высота оси вращения 200 и 225 мм) сохраняется тот же внутренний диаметр 185 мм, но уже для полюсности $2p = 4$. Такая унификация предусмотрена для всей серии РА (табл. 9.6).

Таблица 9.6. Унификация серии РА

D _{h1} , мм	H, мм	Мощность на валу P _{2ном} , кВт, при синхронной скорости							
		3000 об/мин		1500 об/мин		1000 об/мин		750 об/мин	
		DIN	ГОСТ	DIN	ГОСТ	DIN	ГОСТ	DIN	ГОСТ
120	71	A 0,37 B 0,55	A 0,75 B 1,1	A 0,25 B 0,37	A 0,55 B 0,75	A 0,18 B 0,25	A 0,37 B 0,55	A 0,09 B 0,12	A 0,25 —
120 (140)	80	A 0,75 B 1,1	A 1,50 B 2,2	A 0,5 B 0,75	A 1,1 B 1,5	A 0,37 B 0,55	A 0,75 B 1,1	A 0,18 B 0,25	A 0,37 B 0,55
		S 1,5 L 2,2	— L 3,0	S 1,1 L 1,5	— L 2,2	S 0,75 L 1,1	— L 1,5	B 0,37 L 0,55	LA 0,75 LB 1,1
150 (140)	100	— L 3,0	S 4,0 L 5,5	LA 2,2 LB 3,0	S 3,0 L 4,0	— L 1,5	— L 2,2	LA 0,75 LB 1,1	— L 1,5
		M 4,0	M 7,5	M 4,0	M 5,5	M 2,2	MA 3,0 MB 4,0	M 1,5	MA 2,2 MB 3,0
176 (206)	112	SA 5,5 SB 7,5	— M 11,0	S 5,5 M 7,5	S 7,5 M 11,0	S 3,0 MA 4,0 MB 5,5	S 5,5 M 7,5	S 2,2 M 3,0	S 4,0 M 5,5
		MA 11,0 MB 15,0 L 18,5	S 15,0 M 18,5	M 11,0 L 15,0	S 15,0 L 18,5	M 7,5 L 11,0	S 11,0 M 15,0	MA 4,0 MB 5,5 L 7,5	S 7,5 M 11,0
296 (273)	180	M 22,0 —	S 22,0 M 30,0	M 18,5 L 22,0	S 22,0 M 30,0	— L 15,0	M 18,5 —	L 11,0 —	M 15,0 —
		LA 30,0 LB 37,0	M 37,0 L 45,0	— L 30,0	M 37,0 L 45,0	LA 18,5 LB 22,0	M 22,0 L 30,0	— L 15,0	M 18,5 L 22,0
344 (296)	225	— M 45,0	— M 55,0	S 37,0 M 45,0	— M 55,0	— M 30,0	— M 37,0	S 18,5 M 22,0	— M 30,0
		— M 55,0	S 75,0 M 90,0	— M 55,0	S 75,0 M 90,0	— M 37,0	S 45,0 M 55,0	— M 30,0	S 37,0 M 45,0
400 (344)	250	S 75,0 M 90,0	S 110 M 132	S 75,0 M 90,0	S 110 M 132	S 45,0 M 55,0	S 75,0 M 90,0	S 37,0 M 45,0	S 55,0 M 75,0
		M 90,0	—	M 90,0	M 132	M 55,0	M 90,0	M 45,0	M 75,0

Примечание. Буквенные обозначения в соответствии с серией 4А.

Вопросам унификации в новой серии РА уделено особое внимание, поскольку только на одной высоте оси вращения количество типоисполнений двигателей превышает несколько тысяч. Основным достоинством серии РА является возможность выпуска асинхронных двигателей, удовлетворяющих требованиям ГОСТ, DIN и SENELBC и при максимальной унификации отдельных узлов и девшей машины [11].

Внедрение профильной экструзионной станины в серии РА позволило снизить трудоемкость изготовления, повысить качество и снизить массу двигателя за счет лучшего теплосъема с поверхности станины. Экструзионные станины позволили отказаться от чистовой обработки замков статора, а также уменьшить аксиальную длину станины, так как они нарезаются из заготовки, получаемой с металлургических заводов.

Применение экструзионных станин на ЯЭМЗ ограничивалось диаметром 132 мм из-за технологических возможностей завода, но такие станины могут применяться и для больших высот, если это потребуется заказчикам.

Основной недостаток экструзионных станин — их более высокая стоимость по сравнению с литыми станинами.

В табл. 9.7 приведены основные показатели трехфазных асинхронных двигателей серии РА с короткозамкнутым ротором (степень защиты IP44, IP34, U_{1Л} ≤ 660 В).

Таблица 9.7. Показатели трехфазных асинхронных двигателей серии РА с короткозамкнутым ротором (степень защиты IP44, IP54, U ≤ 660 В)

Тип АД	2 р	P _{2h} , кВт	B _δ , Тл	A ₁ А/см	J ₁ , А/ММ ²	η _h , %	cos Φ _h	D _{h1}	D ₁	I ₁	S	Z ₁ /Z ₂
								ММ				
PA71	2	0,55	0,90	173	7,0	72,0	0,80	120	62	50	0,3	24/17
	4	0,37	0,85	210	5,7	65,0	0,66		70	55	0,3	24/17
	6	0,25	0,83	220	6,2	60,0	0,55		70	55	0,3	36/28
PA80	2	1,1	0,85	208	8,2	75,0	0,87	120	62	75	0,3	24/17
	4	0,75	0,87	225	8,0	73,0	0,70	140	90	50	0,3	36/28
	6	0,55	0,80	228	8,3	67,0	0,66	140	95	55	0,3	36/28
PA90	2	2,2	0,83	235	6,7	84,0	0,88	140	76	82	0,3	24/17
	4	1,5	0,77	224	7,9	78,0	0,80		90	90	0,4	36/28
	6	1,1	0,80	228	8,0	73,0	0,73		95	95	0,3	36/28
PA100	2	3,0	0,89	265	7,2	83,0	0,86	140	76	95	0,3	24/17
	4	3,0	0,80	220	7,5	82,0	0,81		90	130	0,4	36/28
	6	1,5	0,79	251	8,0	75,0	0,75		95	125	0,3	36/28
PA112	2	4,0	0,66	230	5,8	83,5	0,88	206	117	90	0,6	36/28
	4	4,0	0,75	260	5,0	86,5	0,84		129	90	0,45	36/28
	6	2,2	0,80	241	7,2	79,5	0,79		145	70	0,35	54/44
PA132	2	7,5	0,68	215	5,8	87,0	0,89	206	117	130	0,6	36/28
	4	7,5	0,87	289	5,5	88,5	0,84		129	145	0,45	36/28
	6	5,5	0,83	279	8,0	82,0	0,78		145	140	0,35	54/44
PA160	2	15,0	0,80	290	5,2	90,0	0,90	273	155	110	0,8	36/28
	4	15,0	0,80	329	5,3	90,0	0,87		172	130	0,5	48/38
	6	11,0	0,90	300	5,6	87,5	0,83		185	140	0,45	54/50
PA180	2	22,0	0,80	300	5,4	91,0	0,90	273	155	180	0,8	36/28
	4	22,0	0,86	345	5,5	91,0	0,88		172	185	0,5	48/38
	6	15,0	0,90	313	5,7	89,5	0,80		185	180	0,45	54/50
PA200	2	37,0	0,73	344	4,0	90,5	0,89	296	163	215	0,9	36/28
	4	30,0	0,81	385	4,9	91,5	0,83		185	200	0,55	48/40
	6	22,0	0,77	350	5,2	89,0	0,85		209	210	0,45	72/56
PA225	2	45,0	0,67	348	4,2	92,0	0,90	296	163	265	0,9	36/28
	4	45,0	0,85	392	4,7	92,0	0,87		185	290	0,55	48/40
	6	30,0	0,82	400	5,3	89,5	0,86		209	240	0,45	72/56
PA250	2	55,0	0,67	355	3,8	93,0	0,92	344	190	240	1,1	48/40
	4	55,0	0,98	362	6,1	92,5	0,88	400	240	200	0,8	60/50
	6	37,0	0,75	377	5,7	90,5	0,85	344	240	240	0,6	72/56

Освоение серии РА позволило сократить зависимость России от импорта и развить экспорт асинхронных двигателей. Технико-экономические показатели двигателей серии РА соответствуют или превосходят лучшие аналоги зарубежных фирм, а цены на продукцию значительно ниже, чем у конкурентов.

9.5. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА

Техническое задание на учебное проектирование асинхронного двигателя содержит номинальные данные проектируемой машины и указания о режиме ее работы, исполнении по способу монтажа, степени защиты от воздействия окружающей среды и системе охлаждения. Кроме того, могут быть заданы также дополнительные требования к проектируемому двигателю, например наименьшие допустимые значения кратности максимального и минимального моментов, а для двигателей с короткозамкнутыми роторами также предельные значения пускового тока и наименьшие значения пусковых моментов. В отношении требований, не оговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТам. Методические указания к курсовому проекту см. в 1.7.

Проектирование новой машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров, и при

разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция двигателя одной из новых серий, выпускаемых в настоящее время. Например, при проектировании асинхронных двигателей общего назначения малой и средней мощности (до 400 кВт) в качестве базовой модели следует выбирать конструкцию двигателей серии 4А или АИ и исполнения, предусмотренного в техническом задании.

В начальной стадии проектирования при выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания. Если проектируемая машина должна иметь большой максимальный момент, то индуктивное сопротивление ее обмоток не должно быть слишком, поэтому в такой машине нецелесообразно выбирать малое значение индукций, большую линейную нагрузку, узкие и глубокие пазы и т.п.

Требования к пусковым характеристикам с короткозамкнутым ротором следует обязательно учитывать при выборе конфигурации пазов ротора. Так, узкие и глубокие пазы с сужающейся верхней частью обеспечивают большое увеличение расчетного активного сопротивления ротора при пуске и большие пусковые моменты, но при таких пазах возрастает индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора и уменьшаются перегрузочная способность двигателя и коэффициент мощности при номинальном режиме.

Полностью учесть все требования технического задания к характеристикам двигателя при выборе размеров магнитопровода и обмотки машины, не ориентируясь на данные выпущенных машин, невозможно. Поэтому перед началом расчета следует детально и изучить конструкцию базового двигателя, критически оценить принятые в ней соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные и лишь после этого приступить к расчету. Расчет асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины магнитопровода l_δ . Размеры D и l_δ связаны с мощностью, угловой скоростью и электромагнитными нагрузками выражением машинной постоянной:

$$\frac{D^2 l_\delta \Omega}{p} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{ob} A B_\delta}. \quad (9.1)$$

В начале расчета двигателя все величины, входящие в (9.1), кроме синхронной угловой скорости, неизвестны. Поэтому расчет проводят, задаваясь на основании имеющихся рекомендаций значениями электромагнитных нагрузок (A и B_δ), коэффициентов (α_δ , k_B и k_{ob}), и приближенно определяют расчетную мощность P' . Остаются два неизвестных (D и l_δ), однозначное определение которых без дополнительных условий невозможно. Таким условием является отношение l_δ/D или более употребительное в расчетной практике отношение $\lambda = l_\delta / \tau$. Это отношение в значительной степени определяет экономические данные машин, а также оказывает влияние на характеристики и условия охлаждения двигателей.

У большинства выпускаемых асинхронных двигателей общего назначения отношение λ , изменяется в достаточно узких пределах. Поэтому для определения D и l_δ можно предварительно выбрать то или иное отношение λ , характерное для заданного исполнения и числа полюсов машины. Это позволит однозначно определить главные размеры, исходя из (9.1). Однако внутренний диаметр статора непосредственно связан определенными размерными соотношениями с внешним диаметром статора D_a , в свою очередь, определяющим высоту оси вращения h , значение которой при проектировании новых двигателей может быть принято только из стандартного ряда высот, установленных ГОСТом.

Внешний диаметр статора должен также соответствовать определенным условиям, налагаемым требованиями раскроя листов электротехнической стали с наименьшими отходами при штамповке. С учетом этих требований при ручном расчете асинхронного двигателя более целесообразным является выбор главных размеров, основанный на предварительном

определении высоты оси вращения, увязке этого размера с внешним диаметром статора и последующем расчете внутреннего диаметра статора D .

В связи с этим выбор главных размеров проводят в следующей последовательности.

Высоту оси вращения предварительно определяют по рис. 9.18, а или б для заданных P_2 и $2p$ в зависимости от исполнения двигателя.

Из ряда высот осей вращения (см. табл. П 6.2) принимают ближайшее к предварительно найденному меньшему стандартному значению L . Следует иметь в виду, что ГОСТ определяет стандартные высоты осей вращения независимо от назначения и конструктивного исполнения асинхронных двигателей, поэтому высота оси вращения любого проектируемого двигателя должна быть равна одному из этих значений.

Зависимость (9.1) показывает, что при одной и той же длине l мощность P' изменяется пропорционально D^2 . Поэтому машину при выбранной высоте оси вращения выгодно выполнять с возможно большим диаметром. Максимально возможный диаметр D_a должен быть $D_a \leq 2(h - h_{1min})$, где h_{1min} — минимальное расстояние от стали сердечника статора до опорной плоскости машины (рис. 9.19), включающее толщину корпуса $b_{корп}$ и расстояние от корпуса до опорной плоскости h_2 . Если машина выполняется со сварной станиной, то допустимое расстояние h_{1min} уменьшается. В том случае, когда $h_1 >> h_{1min}$, в нижней части корпуса оребренных двигателей исполнения со степенью защиты IP44 размещают несколько охлаждающих ребер, высота которых может быть меньше, чем у расположенных на верхней и боковых частях корпуса.

Обычно расстояние h_1 выбирают равным или несколько большим h_{1min} , значения которого для двигателей с различной высотой оси вращения h приведены на рис. 9.19. При выборе D_a должно быть учтено также требование использования для штамповки рулонной или листовой электротехнической стали стандартных размеров с наименьшими отходами.

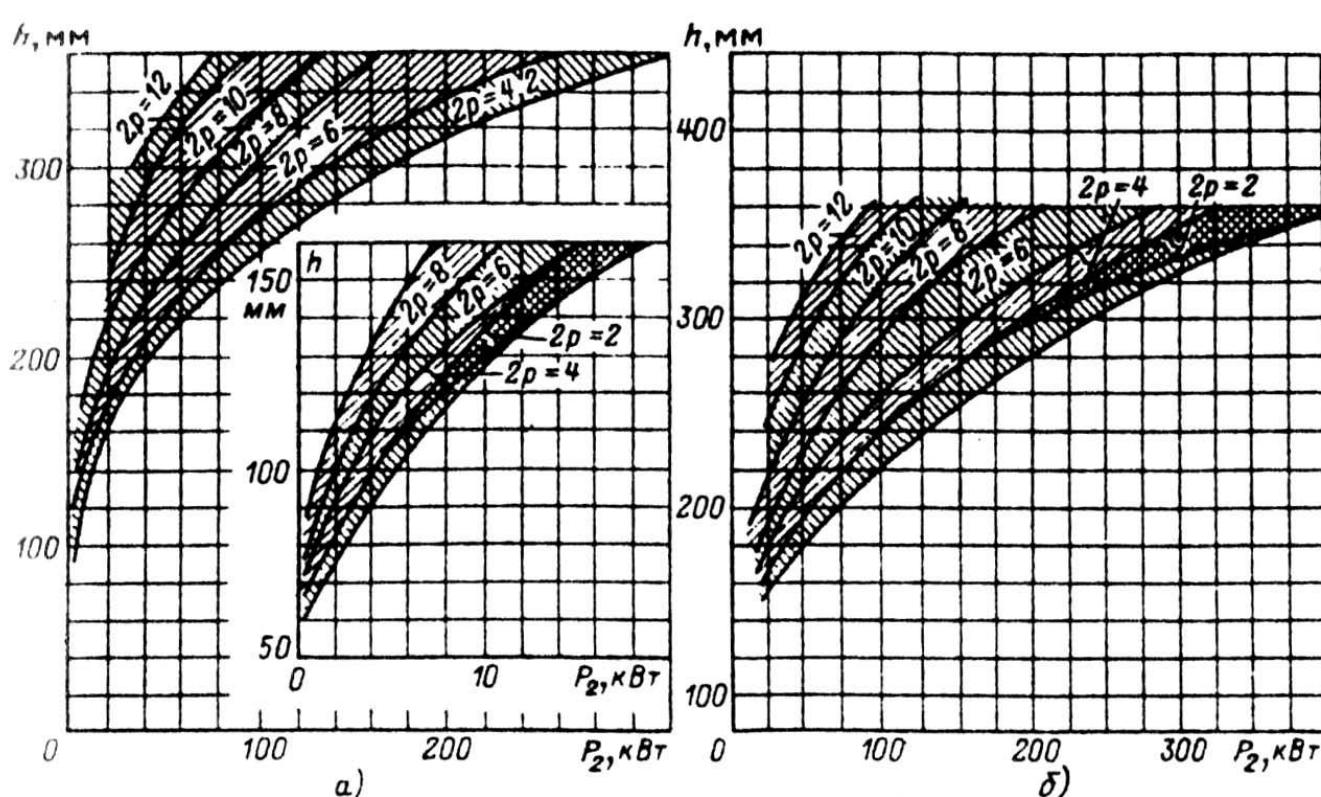


Рис. 9.18. Высота оси вращения h двигателей различных мощности и частоты вращения:
а — со степенью защиты IP44;

Внешние диаметры сердечников статоров двигателей серий в зависимости от высоты оси вращения при учебном проектировании могут быть приняты по данным табл. 9.8.

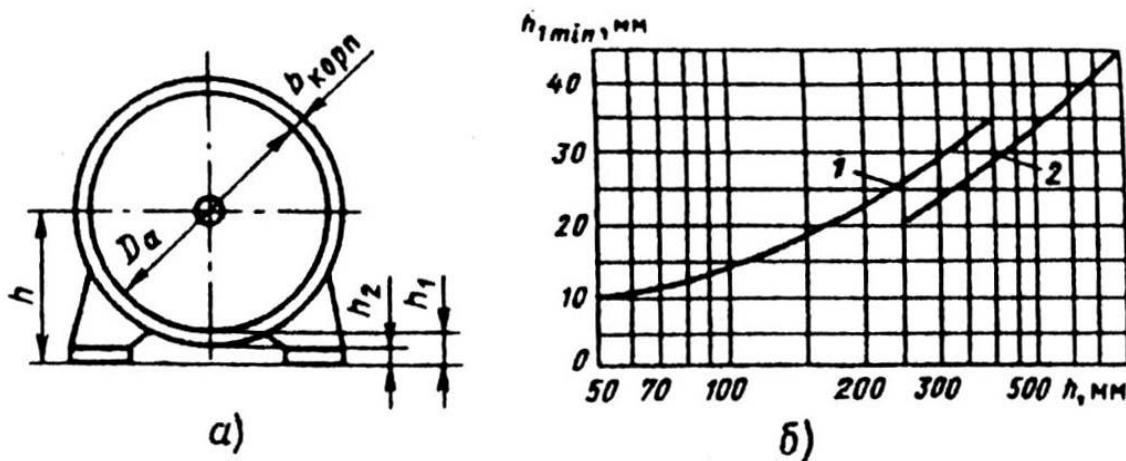


Рис. 9.19. К выбору наружного диаметра D_c статора (а).

Минимально допустимое расстояние h_1 от сердечника статора до опорной поверхности двигателя в зависимости от высоты оси вращения двигателей со станиной (б):

1 — литой; 2 — сварной

Таблица 9.8. Внешние диаметры статоров асинхронных двигателей различных высот оси вращения

h , мм	56	63	71	80	90
D_a , мм	0,08—0,096	0,1—1,08	0,116—0,122	0,131—0,139	0,149—0,157
h , мм	100	112	132	160	180
D_a , мм	0,168—0,175	0,191—0,197	0,225—0,233	0,272—0,285	0,313—0,322
h , мм	200	225	250	280	315 255
D_a , мм	0,349—0,359	0,392—0,406	0,437—0,452	0,52—0,53	0,59 0,66

Внутренний диаметр статора D в общем случае можно определить по внешнему диаметру, высотам ярма (h_a) и зубцов (h_z) статора:

$$D = D_a - 2(h_a + h_z).$$

На данном этапе расчета размеры h_a и h_z неизвестны. Поэтому для определения D используют эмпирические зависимости. При одном и том же уровне индукции на участках магнитопровода в машинах с одинаковым D высота ярма статора будет пропорциональна потоку, а следовательно, обратно пропорциональна числу полюсов машины (прямо пропорциональна полюсному делению). Принимая, что размеры пазов не зависят от числа полюсов машины, получаем приближенное выражение

$$D = K_D D_a. \quad (9.2)$$

Значения коэффициентов K_D , приведенные в табл. 9.9, характеризуют отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей серий 4А и АИ при различных числах полюсов и могут быть использованы для предварительного определения D вновь проектируемой машины.

Таблица 9.9. Отношение $K_D = D/D_a$, в асинхронных двигателях
в зависимости от числа полюсов

$2p$	2	4	6	8	10—12
K_D	0,52—0,6	0,62—0,68	0,7—0,72	0,72—0,75	0,75—0,77

Далее находят полюсное деление τ , м:

$$\tau = \pi D/2p \quad (9.3)$$

и расчетную мощность P , Вт • А:

$$P' = mIE = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} \quad (9.4)$$

где P_2 — мощность на валу двигателя, Вт; k_E — отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое может быть приближенно определено по рис. 9.20.

Предварительные значения η и $\cos \varphi$, если они не указаны в задании на проектирование, находятся по ГОСТу. Приближенные значения η и $\cos \varphi$ могут быть приняты по кривым рис. 9.21.

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок A , А/м, и B_δ , Тл, должен быть проведен

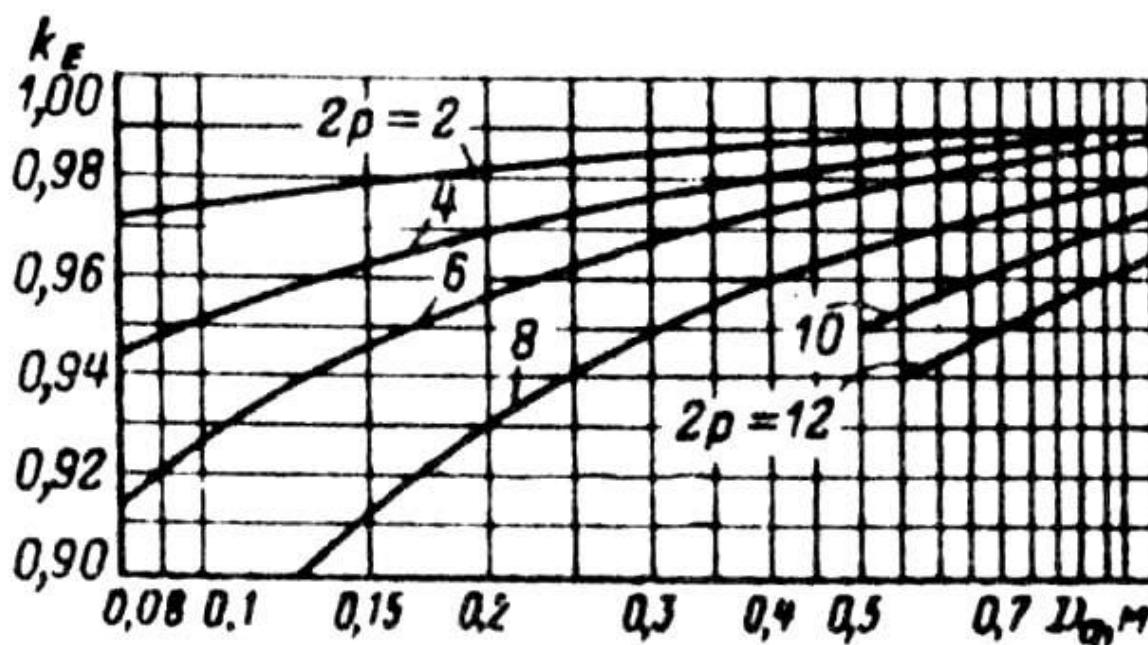


Рис. 9.20. Значения коэффициента K_E

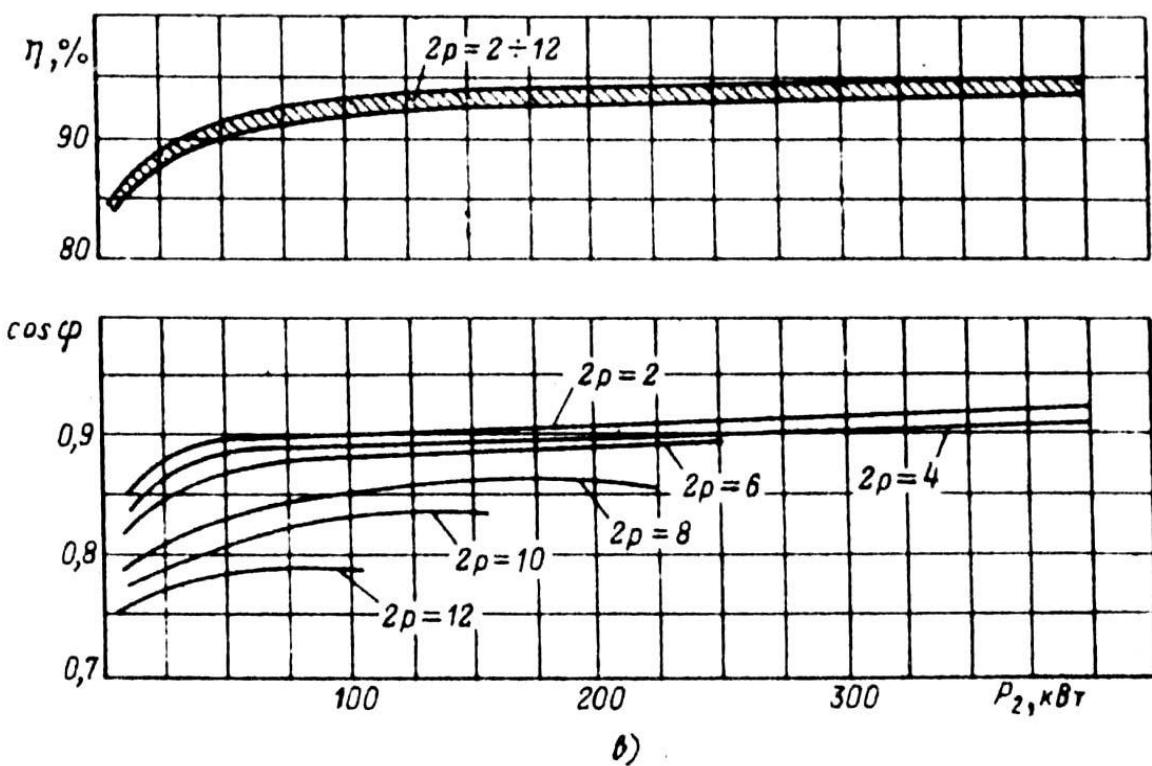
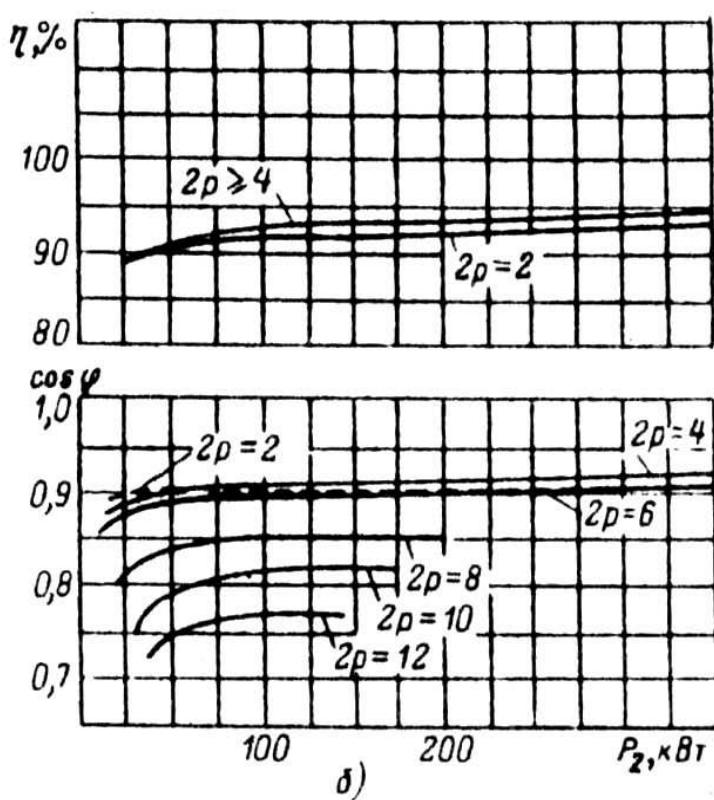
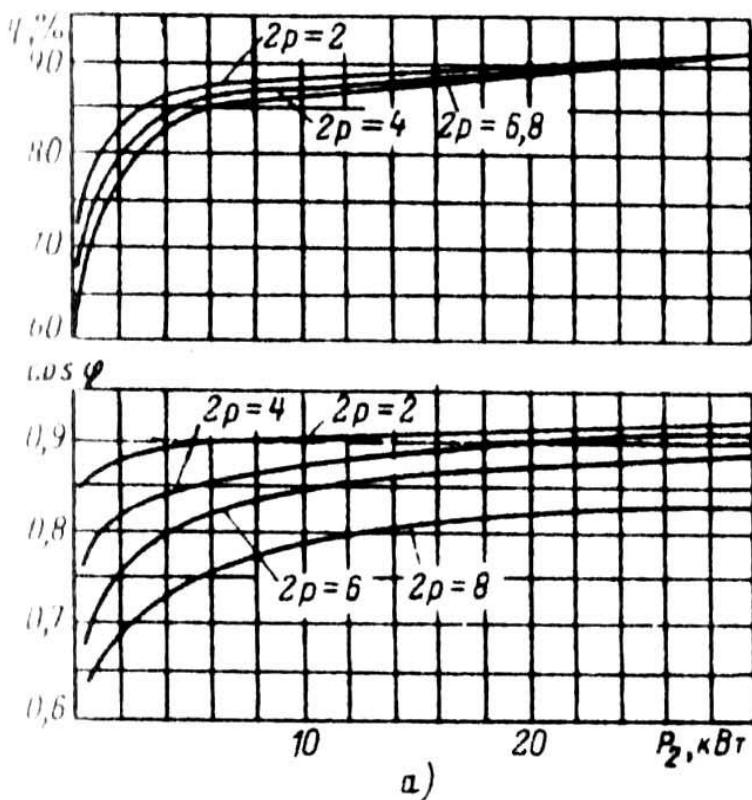
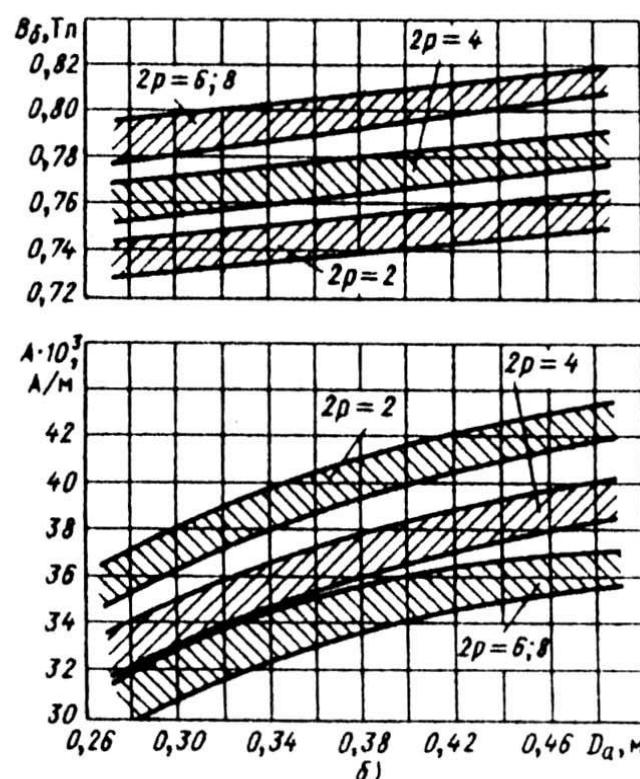
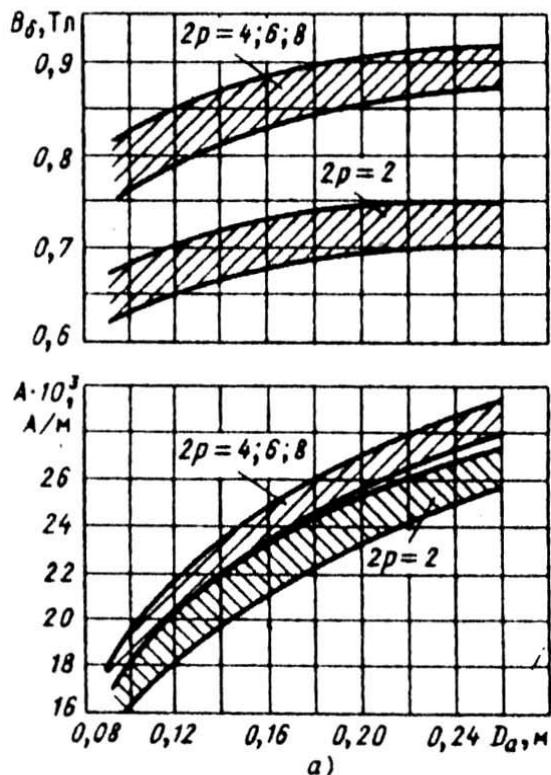


Рис. 9.21. Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей:
 а — со степенью защиты IP44 и мощностью до 30 кВт;
 б — со степенью защиты IP44 и мощностью до 400 кВт;
 в — со степенью защиты IP23

особо тщательно, так как они определяют не только расчетную длину сердечника, но и в значительной степени характеристики машины. При этом если главные размеры машины

зависят от произведения AB_δ [см. (9.1)], то на характеристики двигателя оказывает существенное влияние также и соотношение между этими величинами. Рекомендации по выбору A и B_δ представлены в виде кривых на рис. 9.22—9.24 для машин различных мощности и исполнения. На каждом из рисунков даются области их допустимых значений. При выборе конкретных значений A и B_δ в пределах рекомендуемой области следует, руководствуясь приведенными выше замечаниями, учитывать требования технического задания к характеристикам проектируемого двигателя.

Коэффициент полюсного перекрытия a_δ и коэффициент формы поля k_B в асинхронных машинах определяются степенью уплощения кривой поля в зазоре, возникающей при насыщении зубцов статора и ротора, и могут быть достаточно достоверно определены только после расчета магнитной цепи. Поэтому для расчета магнитной цепи удобнее рассматривать синусоидальное поле, а влияние уплощения учесть при расчете магнитного напряжения отдельных участков магнитной цепи.



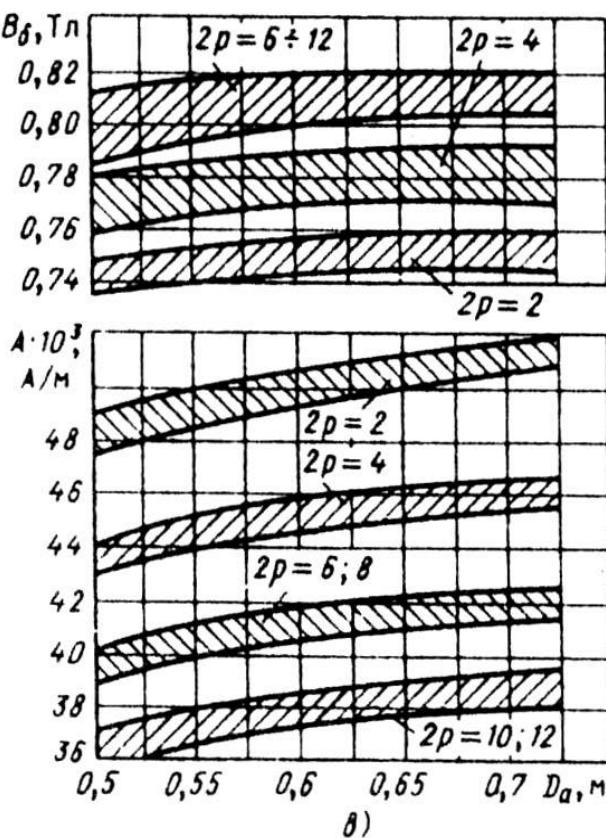


Рис. 9.22. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 при высоте оси вращения:
 а – $h \geq 132$ мм; б – $h = 150 \dots 250$ мм;
 в – $h \geq 280$ мм (с продуваемым ротором)

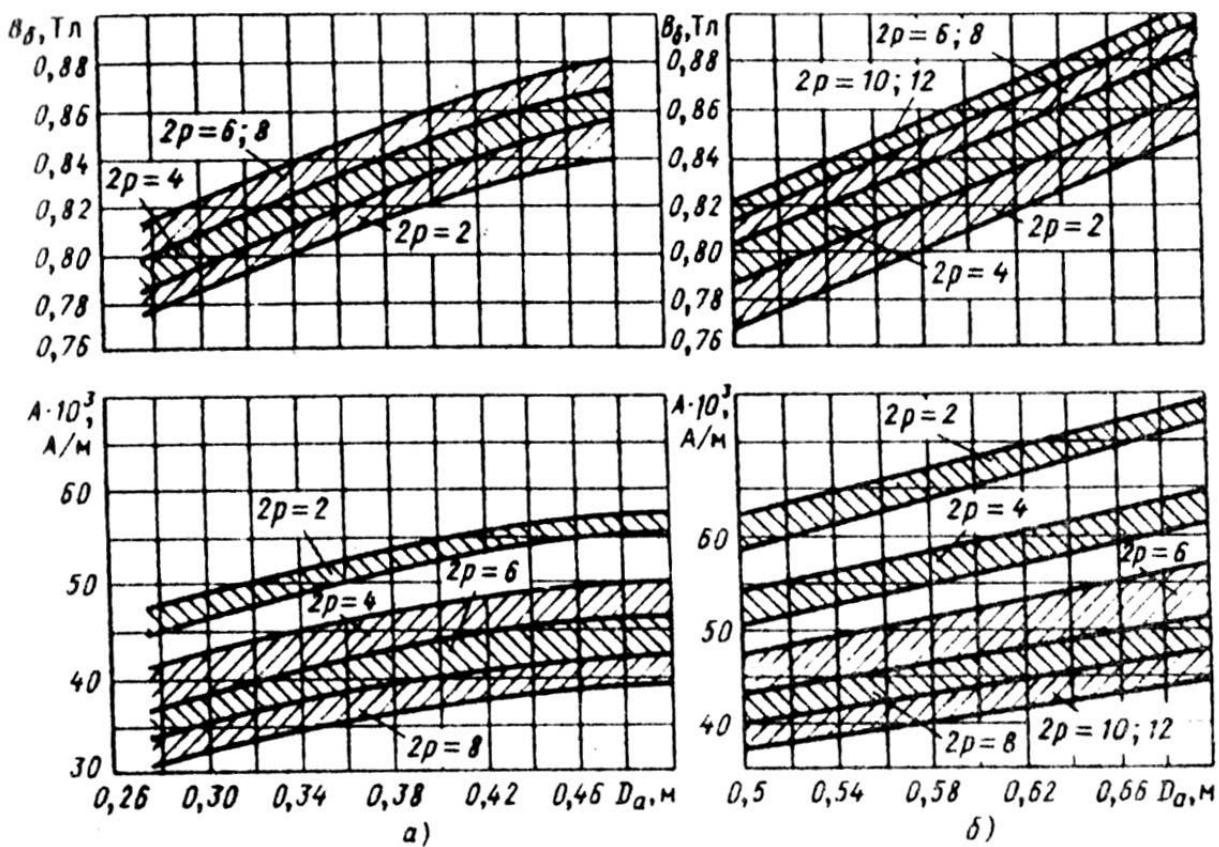


Рис. 9.23. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 при высоте оси вращения:
 а — $h = 160 \dots 250$ мм; б — $h \geq 280$ мм;

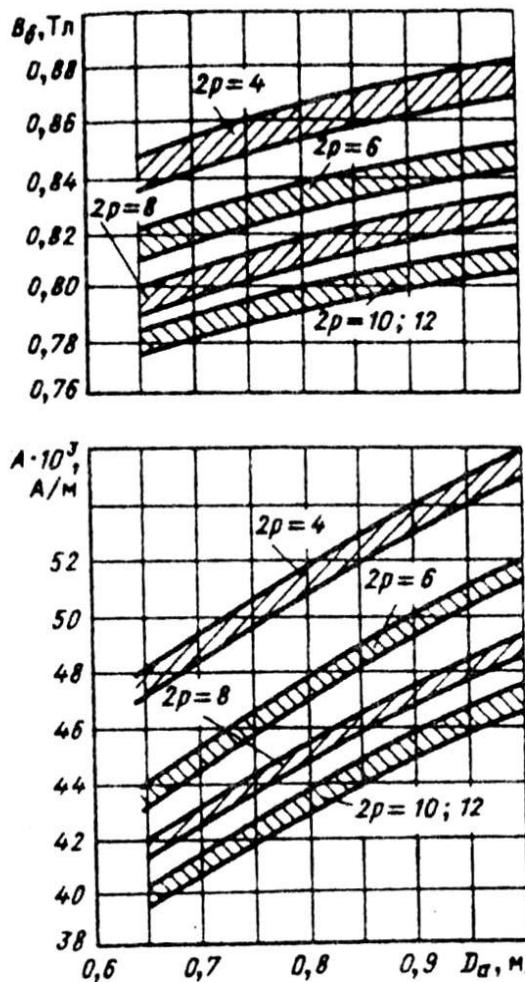


Рис. 9.24. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей высокого напряжения со степенью защиты IP23

Основываясь на этом, значения коэффициентов предварительно принимают равными:

$$\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0,64; \quad k_B = \pi/(2\sqrt{2}) = 1,11.$$

Предварительное значение обмоточного коэффициента k_{0e} выбирают в зависимости от типа обмотки статора. Для однослойных обмоток $k_{061} = 0,95 \dots 0,96$. Для двухслойных и одно-двуихслойных обмоток при $2p = 2$ следует принимать $k_{061} = 0,90 \dots 0,91$ и при большей полюсности $k_{061} = 0,91 \dots 0,92$.

Синхронная угловая частота двигателя Ω , рад/с, рассчитывается по формуле

$$\Omega = 2\pi \frac{n_1}{60} \quad \text{или} \quad \Omega = 2\pi \frac{f_1}{p} \quad (9.5)$$

где n_1 — синхронная частота вращения, об/мин; f_1 — частота питания, Гц.

Из (9.1), с учетом значения α_δ , расчетная длина магнитопровода, м,

$$l_{\delta} = \frac{p'}{D^2 \Omega k_B k_{ob1} A B_{\delta}}. \quad (9.6)$$

Критерием правильности выбора главных размеров D и l_{δ} служит отношение $\lambda = l_{\delta} / \tau$, которое обычно находится в пределах, показанных на рис. 9.25 для принятого исполнения машины. Если λ оказывается чрезмерно большим, то следует повторить расчет для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения A . Если K слишком мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h .

На этом выбор главных размеров заканчивается. В результате проделанных вычислений получены значения высоты оси вращения h , внутреннего диаметра статора D , внешнего диаметра статора D_a , расчетной длины магнитопровода l_{δ} и полюсного деления τ .

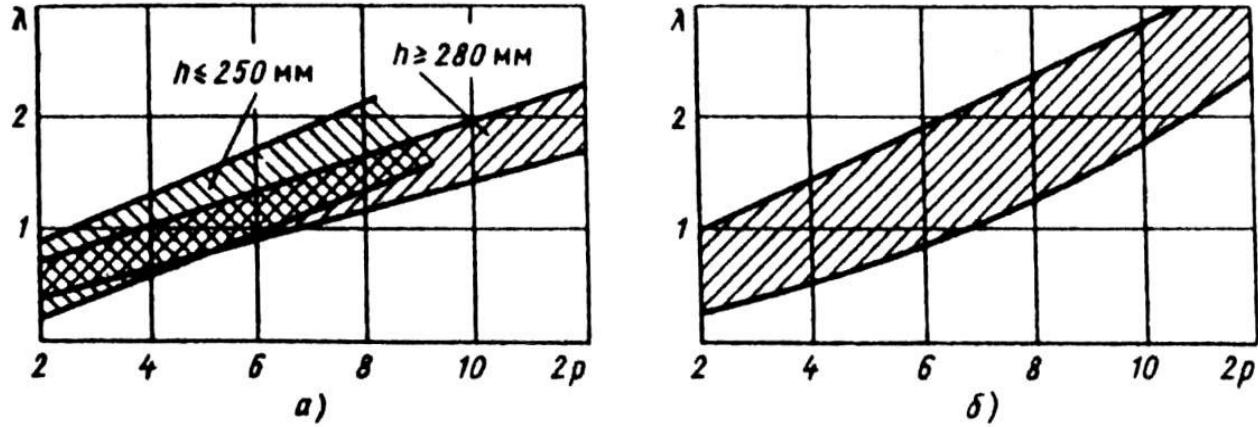


Рис. 9.25. Отношение $\lambda = l_{\delta} / \tau$ у двигателей исполнения по степени защиты:
а – IP44; б – IP23

Для расчета магнитной цепи помимо l_{δ} необходимо определить ценностью конструктивную длину и длину стали сердечников статора (l_1 и l_{ct1}) и ротора (l_2 и l_{ct2}). В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250..300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции

$$l_1 = l_{cm1} = l_{\delta}. \quad (9.7)$$

В более длинных машинах сердечники подразделяют на отдельные пакеты, разделенные между собой радиальными вентиляционными каналами. В двигателях с фазными роторами или со сварной короткозамкнутой обмоткой пакеты выполняют длиной 40...60 мм. Крайние пакеты могут быть более длинными. В двигателях с литой короткозамкнутой обмоткой ротора число пакетов по технологическим соображениям из-за сложности заливки уменьшают и пакеты выполняют более длинными.

Стандартная ширина радиального воздушного канала между пакетами $b_k = 10$ мм. Число пакетов n_{pak} и их длина l_{pak} связаны с расчетной длиной следующим соотношением:

$$n_{pak} = l_{cm} / l_{nak} \approx l_{\delta} / l_{nak} = \text{целое число}, \quad (9.8)$$

при этом число радиальных каналов $n_k = n_{\text{пак}} - 1$.

Длина стали сердечника статора в таких машинах

$$l_{cm1} = l_{nak} n_{nak}, \quad (9.9)$$

или при пакетах разной длины

$$l_{cm1} = \sum l_{nak} \quad (9.10)$$

Конструктивная длина сердечника статора

$$l_I = l_{cm1} + b_k n_k. \quad (9.11)$$

Окончательное значение l_δ для машин с $\delta < 1,5$ мм

$$l_\delta \approx l_{cm1}. \quad (9.12)$$

В машинах с $\delta \geq 1,5$ мм при расчете l_δ учитывают искривление магнитных силовых линий потока в воздушном зазоре над радиальными вентиляционными каналами (см. § 4.2):

$$l_\delta \approx l_I - b'_k n_k, \quad (9.13)$$

где b'_k — расчетная ширина радиальных каналов, зависящая от соотношения δ и δ_k . Значение b'_k при $b_k = 10$ мм определяется по табл. 9.10 либо из выражения

$$b'_k = \gamma' \delta \quad (9.14)$$

Таблица 9.10. Расчетная ширина радиальных каналов b'_k ; при $B^* = 10$ мм

$\delta, \text{мм}$	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0
$b'_k, \text{мм}$	7,3	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,2	5,7

где

$$\gamma' = \frac{2(b_k/\delta)^2}{5 + 2(b_k/\delta)}.$$

Конструктивную длину сердечника ротора в машинах с $h < 250$ мм берут равной длине сердечника статора, т. е. $l_2 = l_I$. В двигателях больших габаритов ротор выполняют длиннее статора за счет увеличения длины его крайних пакетов на 5 мм и в крупных машинах высокого напряжения — на 10 мм.

Длина стали сердечника ротора

$$l_{cm2} = \sum l_{nak2} = l_2 - n_k b_k \quad (9.15)$$

Следующий этап расчета включает определение числа пазов статора Z_1 и числа витков в фазе обмотки статора w_1 . При этом число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка двигателя и индукция в воздушном зазоре как можно более близко

совпадали с их значениями, принятыми предварительно при выборе главных размеров, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Чтобы выполнить эти условия, вначале выбирают предварительно зубцовое деление t_{z1} , в зависимости от типа обмотки, номинального напряжения и полюсного деления машины. Для более равномерного распределения катушек обмотки по длине окружности зазора необходимо большое число пазов, а следовательно, маленькие зубцовые деления. В то же время ширина паза, составляющая примерно половину зубцового деления, не должна быть слишком малой, так как в этом случае ухудшается заполнение паза медью обмотки, а в машинах небольшой мощности может также недопустимо уменьшиться механическая прочность зубцов. Кроме того, надо иметь в виду, что стоимость машины с увеличением числа пазов возрастает, так как увеличиваются сложность штампа и трудоемкость изготовления и укладки обмоток.

Значения зубцовых делений статора асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода, необходимые для предварительного выбора числа пазов, приведены на рис. 9.26. Меньшие значения в каждой из показанных на рисунке областей возможных значений t_{z1} характерны для машин меньшей мощности для каждого из диапазонов высот осей вращения. Следует отметить, что двигатели с $h \geq 280$ мм обычно выполняют с обмоткой из прямоугольного провода, но в многополюсном исполнении при $2p \geq 10$ (в двигателях с $h = 280$ и 315 мм) из-за малой высоты спинки статора размещение лобовых частей катушек из прямоугольного провода затруднено, поэтому такие машины выполняют с намоткой из круглого провода, имеющей мягкие, легко поддающиеся формовке лобовые части.

Для машин с обмоткой из прямоугольного провода при $U_{\text{ном}} \leq 660$ В и в высоковольтных машинах t_{z1} зависит от мощности и номинального напряжения и может быть взято в соответствии с данными табл. 9.11. В процессе расчета целесообразно не ограничиваться выбором какого-либо одного конкретного зубцового деления, а, руководствуясь приведенными выше соображениями, рассмотреть диапазон возможных значений t_{z1} в пределах указанных значений зубцовых делений $t_{z1\min} \dots t_{z2\max}$. Тогда возможность числа пазов статора, соответствующих выбранному диапазону t_{z1} ,

$$Z_{1\min} \dots Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{z1\max}} \dots \frac{\pi D}{t_{z2\min}} \quad (9.16)$$

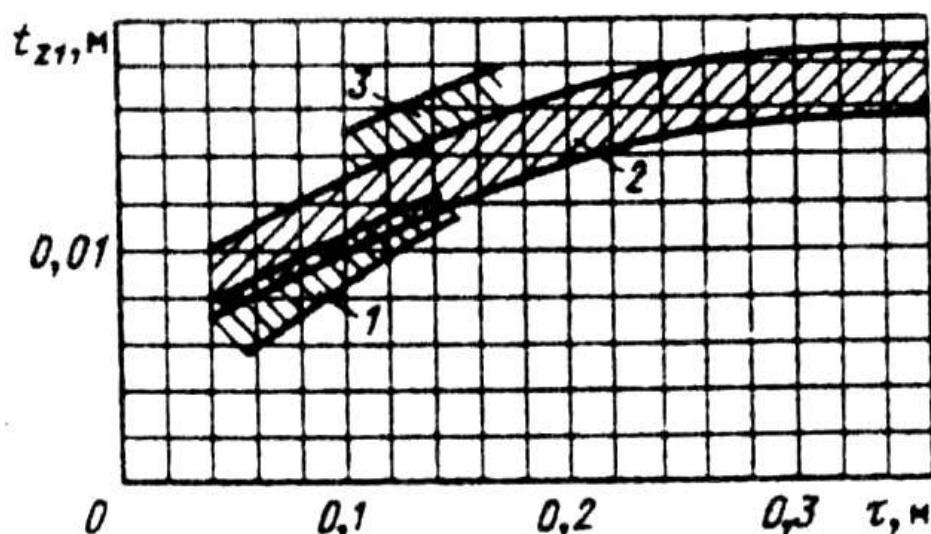


Рис. 9.26. Зубцовые деления статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода

с высотами оси вращения:

1 — $h < 90$ мм;

2 — $90 < h < 250$ мм; 3 — $h < 280$ мм

Таблица 9.11. Зубцовое деление статора f_z , м, при прямоугольных пазах

Полюсное деление τ , м	Напряжение, В		
	до 660	3000	6000
Менее 0,15	0,016—0,02	0,022—0,025	0,024—0,03
0,15—0,4	0,017—0,022	0,024—0,027	0,026—0,024
Более 0,4	0,02—0,028	0,026—0,032	0,028—0,038

Окончательное число пазов статора Z_1 следует выбирать в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательного для проектируемой машины значения числа пазов на полюс и фазу q_1 . Число пазов статора в любой обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число $q_1 = Z_1/(2pm)$ в большинстве асинхронных машин должно быть целым. Лишь в многополюсных асинхронных двигателях иногда выполняют такое число пазов, при котором q_1 является дробным, причем большей частью со знаменателем дробности, равным двум, например $q_1 = 2 \frac{1}{2}$ или $3 \frac{1}{2}$. В отдельных случаях это правило может быть нарушено, однако необходимо иметь в виду, что обмотки с дробным q_1 при сравнительно небольших числах пазов и полюсов, характерных для большинства асинхронных двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Поэтому выбор окончательного числа пазов следует проводить с четкой увязкой и контролем получаемого при этом числа q . Окончательное значение $t_{z1} = \pi D/(2pmq)$ не должно выходить за указанные выше пределы более чем на 10 % и в любом случае для двигателей с $h \geq 56$ мм не должно быть менее 6—7 мм.

При определении числа эффективных проводников в пазу u_n руководствуются следующим: u_n должно быть целым, а в двухслойной обмотке желательно, чтобы оно было кратным двум. Применение двухслойных обмоток с нечетным u_n допускается лишь в исключительных случаях, так как это приводит к необходимости выполнять разновитковые катушки, что усложняет технологию изготовления и укладки обмотки. Поэтому полученные в расчете числа u_n приходится округлять до ближайшего целого или четного числа. Чтобы это округление не было слишком грубым (что особенно заметно при малых u_n), вначале определяют предварительное число эффективных проводников в пазу u'_n при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют ($a = 1$):

$$u'_n = \pi D A / I_{1\text{ном}} Z_1, \quad (9.17)$$

где A — принятное ранее значение линейной нагрузки, А/м; $I_{1\text{ном}}$ — номинальный ток обмотки статора, А:

$$I_{1\text{ном}} = P_2 / (m U_{1\text{ном}} \eta \cos \varphi) \quad (9.18)$$

(η и $\cos \varphi$ заданы или выбраны в начале расчета).

Полученное по (9.17) значение u'_n не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмотки a , при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения:

$$u_n = a u'_n. \quad (9.19)$$

Число a при этом, естественно, может быть взято только из ряда возможных чисел параллельных ветвей для обмотки данного типа и заданного числа полюсов (см. гл. 3).

Полученное из (9.19) число округляют до ближайшего целого или четного в зависимости от типа обмотки.

Принятое на данном этапе расчета число параллельных ветвей a в дальнейшем при выборе размеров и числа элементарных проводников может быть изменено. В этом случае пропорционально изменяется также и u_n

Окончательное число витков в фазе обмотки

$$w_1 = U_n Z_l / (2am). \quad (9.20)$$

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м,

$$A = 2I_{1\text{nom}} w_i m / (\pi D). \quad (9.21)$$

Оно, как правило, незначительно отличается от принятого ранее, так как его изменение определяется только отношением рассчитанного по (9.19) и принятого числа эффективных проводников в пазу u_n . Полученное значение A нужно сопоставить с рекомендуемым (.м.рис. 9.22—9.24).

Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины, ориентируясь на конструкцию и предполагаемую технологию укладки обмотки в пазы. Машины мощностью до 12..15 кВт в большинстве случаев имеют однослойную концентрическую обмотку из круглого провода. В машинах большей мощности обмотки выполняют двухслойными, а при механизированной укладке применяют одно-двухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага. Все обмотки из прямоугольного провода выполняют только двухслойными, равнокатушечными.

Обмоточный коэффициент $k_{ob} = k_p k_y$ рассчитывают в зависимости от числа пазов на полюс и фазу q и укорочения шага обмотки $\beta = u_{\text{расч}} / \tau$, где $u_{\text{расч}}$ — расчетный шаг, определяемый по формулам, приведенным в § 3.6, в зависимости от типа обмотки.

В двухслойных обмотках асинхронных двигателей шаг выполняют в большинстве случаев с укорочением, близким к $\beta = 0,8$.

После расчета k_{ob1} уточняют значение потока Φ , Вб:

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4k_B w_1 k_{ob1} f_1} \quad (9.22)$$

и определяют индукцию в воздушном зазоре B_δ , Тл:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{p\Phi}{Dl_\delta}. \quad (9.23)$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области (см. рис. 9.22 — 9.24) более чем на $\pm 5\%$, следует принять другое значение числа u_n и повторить расчет.

Если линейная нагрузка и индукция в воздушном зазоре при принятом числе пазов и эффективных проводников в пазу находятся в рекомендуемых пределах, переходят к расчету сечения эффективного проводника и обмоточного провода.

Сечение эффективных проводников, м², определяют, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке:

$$q_{\text{эф}1} = I_{I_{\text{ном}}} / (aJ_1) . \quad (9.24)$$

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока J_1 должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во-первых, на повышении температуры обмотки и, во-вторых, на КПД двигателя. В асинхронных двигателях общего назначения при принятой в них системе косвенного охлаждения влияние плотности тока на нагрев обмотки более существенно, чем на КПД. На этом основании определены качественные зависимости допустимой плотности тока в обмотках различных машин. Она повышается с уменьшением габаритов машины, с увеличением допустимого нагрева обмотки при переходе на другой, более высокий класс нагревостойкости изоляции и с повышением интенсивности охлаждения (например, в машинах защищенного исполнения по сравнению с закрытыми обдуваемыми двигателями).

Нагрев пазовой части обмотки зависит от произведения линейной нагрузки на плотность тока (AJ). Поэтому выбор допустимой плотности тока производят с учетом линейной нагрузки двигателя:

$$J_1 = (AJ) / A . \quad (9.25)$$

Значения (AJ) для асинхронных двигателей различных исполнения и мощности приведены на рис. 9.27.

Для всыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1,8 мм, однако в современных двигателях для повышения надежности обмотки и упрощения ее укладки в пазы используют провода меньшего диаметра. В обмотках, предназначенных для механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке (двигатели с $h > 160$ мм) — не более 1,7 мм.

Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со всыпной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник делят на несколько элементарных. Для этого по табл. П 3.1 подбираются сечение $q_{\text{эл}}$ и число элементарных проводников $n_{\text{эл}}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы диаметр $d_{\text{эл}}$ элементарных проводников не выходил за указанные пределы, а их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника:

$$q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} = q_{\text{эф}} . \quad (9.26)$$

В обмотках из круглого провода число элементарных проводников может быть взято до 8—10, но при большом $n_{\text{эл}}$ возрастают технологические трудности намотки катушек, поэтому в современных машинах стремятся уменьшить число элементарных проводников в одном эффективном до 6—8, для чего увеличивают число параллельных ветвей. В двухполюсных двигателях $n_{\text{эл}}$ увеличивают, поскольку число параллельных ветвей в них не может быть более двух.

При проектировании машин с обмоткой из прямоугольного провода сечение каждого проводника не должно быть взято более 17...20 мм^2 , так как в этом случае становится заметным возрастание потерь на вихревые токи.

Если расчетное значение $q_{\text{эф}} > 20 \text{ мм}^2$, то прямоугольные проводники подразделяют на элементарные так, чтобы $q_{\text{эл}} \leq 17...20 \text{ мм}^2$.

В обмотках из прямоугольного провода, укладываемых в открытые пазы, $n_{\text{эл}}$ обычно не более 2. При $n_{\text{эл}} = 2$ они располагаются на одном уровне по высоте паза (см. рис. 3.7). Обмотку с четырьмя элементарными проводниками (см. рис. 3.7, 6) в асинхронных двигателях применяют редко. Если обмотка выполняется из подразделенных катушек, которые

укладывают в полуоткрытые пазы (см. рис. 3.6, б), то всегда образуются два элементарных проводники, так как катушки, расположенные на одной высоте в пазу, соединяются параллельно (см. § 3.2).

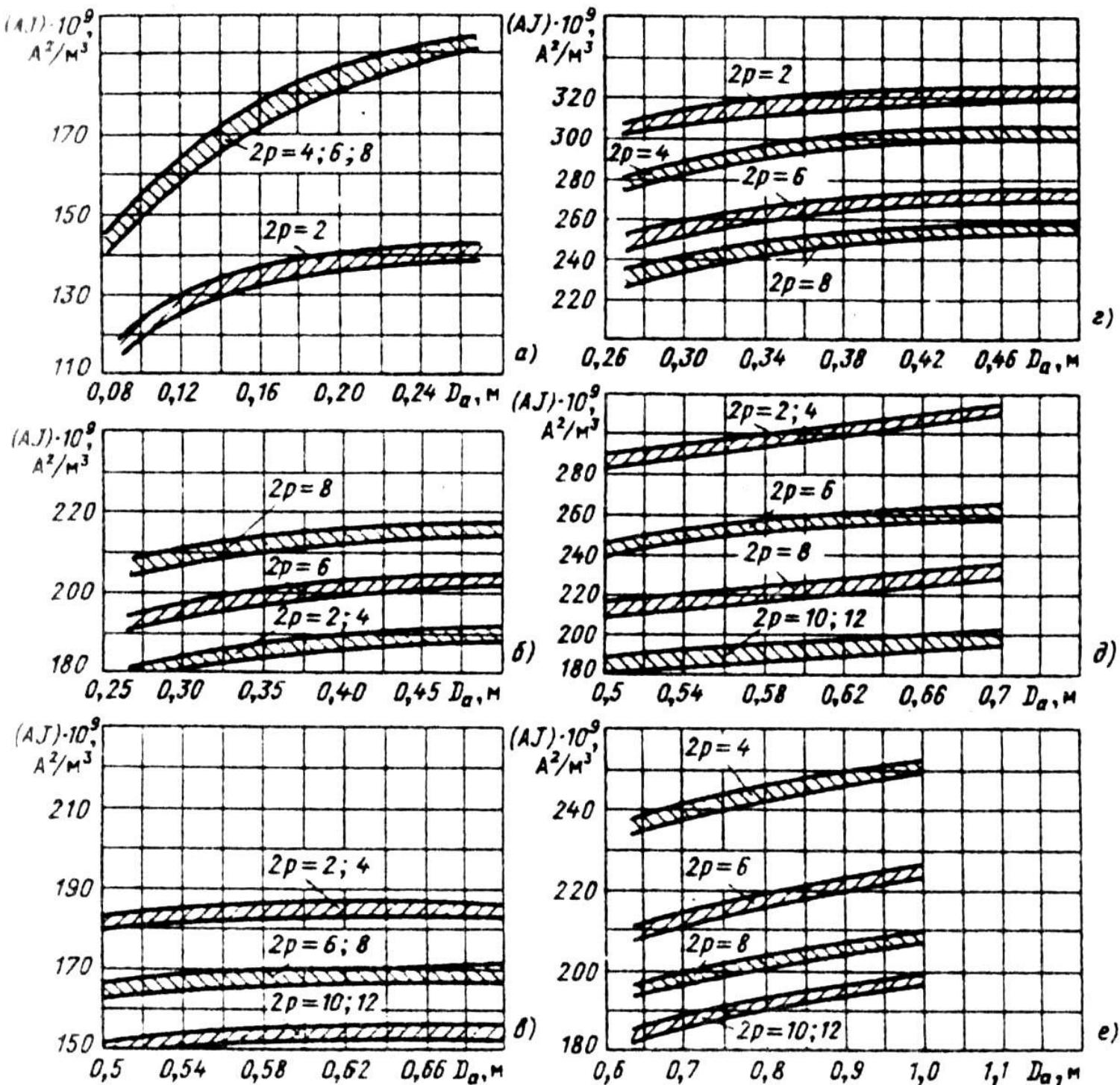


Рис. 9.27. Средние значения произведения AJ
асинхронных двигателей со степенью защиты:
а — IP44, $h \leq 132$ мм; б — IP44, $h = 160 \dots 250$ мм;
в — IP44 $h=280 \dots 355$ мм (при продуваемом роторе);
г — IP23, $h = 160 \dots 250$ мм;
д — IP23, $h = 280 \dots 355$ мм; е — IP23, при $U_{hom}=6000$ В

При прямоугольных обмоточных проводах сечение эффективного проводника не должно превышать 35...40 мм^2 , поэтому при большом номинальном токе в таких машинах выполняют наибольшее возможное число параллельных ветвей.

По одной и той же площади поперечного сечения прямоугольных проводников их линейные размеры $a \times b$ могут быть различны, поэтому окончательный выбор обмоточного провода производят одновременно с расчетом размеров зубцовой зоны.

После окончательного выбора $q_{\text{эл}}$, $n_{\text{эл}}$ и a следует уточнить плотность тока в обмотке, которая может несколько измениться по сравнению с предварительно принятой при подборе сечений элементарных проводников:

$$J_1 = I_{1\text{ном}} / (aq_{\text{эл}} n_{\text{эл}}). \quad (9.27)$$

На этом расчет обмотки статора заканчивается. Некоторая корректировка, которая может потребоваться в ходе последующего расчета, как правило, не вносит существенных изменений в полученные данные.

9.6. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА

Размеры пазов в электрических машинах должны быть выбраны таким образом, чтобы, во-первых, площадь поперечного сечения паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции и, во-вторых, чтобы значения индукций в зубцах и ядре статора находились в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника. Конфигурация пазов и зубцов определяется типом обмотки, который, в свою очередь, зависит от мощности, номинального напряжения и исполнения машины. Расчет размеров зубцовой зоны проводят по допустимым индукциям в ядре и в зубцах статора (табл. 9.12).

Обмотка из прямоугольного провода укладывается в прямоугольные пазы (рис. 9.28). Боковые стенки таких пазов параллельны, поэтому зубцы статора имеют трапециoidalное сечение, и индукция в них неравномерна. Обычно задаются значениями допустимой индукции в ядре статора B_a и индукцией $B_{z\max}$ в наиболее узком сечении зубца $b_{z\min}$ либо индукцией $B_z^{1/3}$ в сечении зубца с шириной $b_z^{1/3}$, взятом на расстоянии, равном 1/3 его высоты от наиболее узкой части зубца (см. рис. 9.28).

По выбранным значениям индукций определяются:

высота ярма статора, м,

$$h_a = \Phi / (2B_a l_{cm1} k_{cm1}); \quad (9.28)$$

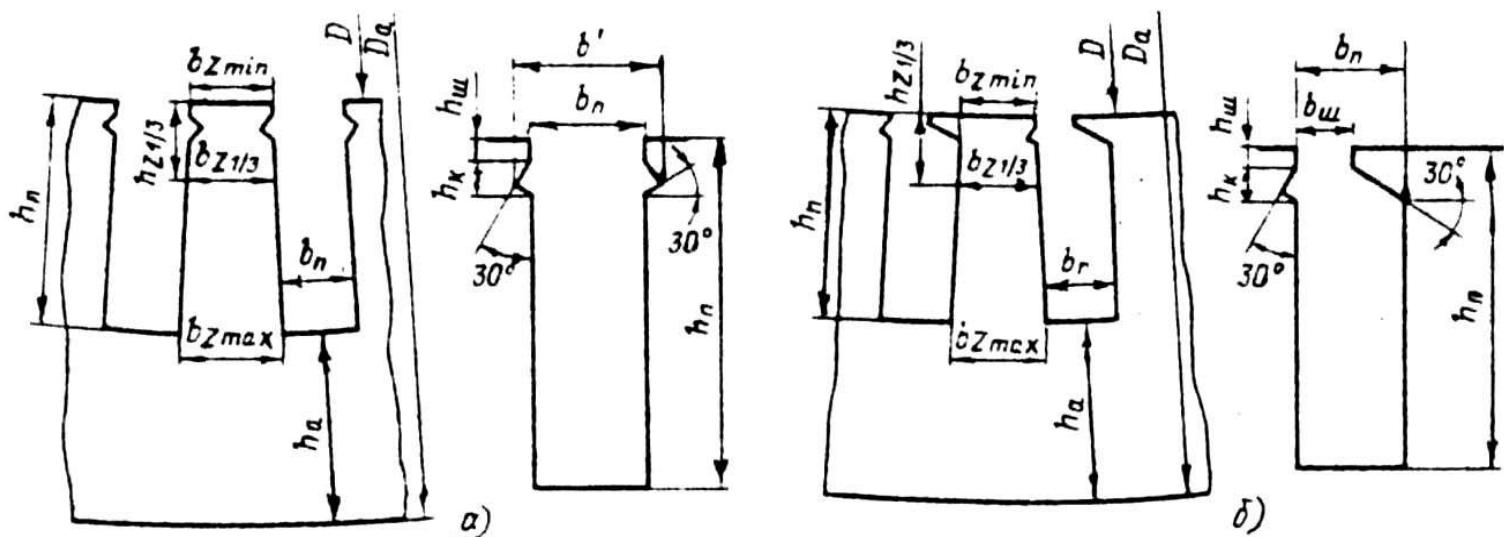


Рис. 9.28. К расчету размеров прямоугольных пазов статора:
а – открытых ; б – закрытых

Таблица 9.12. Допустимые значения индукции на различных участках магнитной цепи, Тл.

Участок магнитной цепи	Обозн аче- ние	Исполнение IP44 при числе полюсов 2р					Исполнение IP23 при числе полюсов 2р					
		2	4	6	8	10 и 12	2	4	6	8	10	12
Ярмо статора	Ba			1,4-1,6	1,15-1,35	1,1-1,2		1,45-1,6		1,2-1,4		1,1-1,3
Зубцы статора при постоянном сечении (обмотка из круглого провода)	Bz ₁			1,6-1,9		1,6-1,8	1,8-2,05		1,7-1,95		1,6-1,9	
Зубцы статора при наиболее узком сечении: при полуоткрытых пазах	Bz _{1max}				1,75-1,95			1,9-2,1			1,8-2	
при открытых пазах	Bz _{1max}				1,6-1,9					1,7-2		
Ярмо ротора: короткозамкнутого фазного	Bj	≤1,45	≤1,4	≤1,2	≤1		≤1,55	≤1,5	≤1,3	≤1,1		
Bj			≤1,3	≤1,15	≤0,9			≤1,4	≤1,2	≤1		
Зубцы ротора при постоянном сечении (трапециoidalные пазы)	Bz ₂			1,7-1,95					1,75-2			
Зубцы ротора в наиболее узком сечении: короткозамкнутого фазного	Bz _{2max}	1,5-1,7		1,6-1,9			1,75-2		1,7-1,95			
	Bz _{2max}	1,75-2,15		1,7-1,95			1,9-2,2		1,85-2,1			

Примечание. Индукции на участках магнитной цепи в большинстве асинхронных двигателей не отличаются от указанных в таблице более чем на 5 %.

минимальная ширина зубца, м,

$$b_{z1min} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{B_{z1max} l_{CT1} k_{c1}} \quad (9.29)$$

или ширина зубца на расстоянии 1/3 его высоты от наиболее узкой части

$$b_{z1/3} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{B_{z1/3} l_{CT1} k_{c1}} \quad (9.30)$$

Значение коэффициента заполнения сердечника сталью следует брать из табл. 9.13.

Таблица 9.13. Способы изолирования листов электротехнической стали и коэффициенты заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора с номинальным напряжением до 660 В

Высота оси вращения	Статор		Короткозамкнутый ротор		Фазный ротор	
	Способ изолирования листов	k_c	Способ изолирования листов	k_c	Способ изолирования листов	k_c
50-250	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97	—	—
280-355	Лакировка	0,95	“	0,97	Лакировка	0,95

Размеры паза вначале определяют без учета размеров и числа проводников обмотки, исходя только из допустимых значений индукций в зубцах и ярме статора:

высота паза, м,

$$h_{nI} = \frac{D_a - D}{2} - h_a ; \quad (9.31)$$

ширина паза, м,

$$b_n = t_{zI} - b_{zImin} \quad (9.32)$$

или

$$b_n = \frac{\pi(D + 2h_{\pi}/3)}{Z_1} - b_{z1/3} \quad (9.33)$$

Обычно $b_n \approx (0,4 \dots 0,5)t_{z1}$

Предварительно определенная ширина паза b_n используется для выбора размеров обмоточного провода. Ширина проводника b должна быть меньше ширины паза на толщину всей изоляции с учетом допусков, т. е. корпусной, витковой (если она устанавливается в данной конструкции) и проводниковой ($2b_{iz}$), а также припусков на сборку сердечников (b_{iz} см. ниже) :

$$b_n = b_n - \Delta'_{uz} \quad (9.34)$$

где Δ'_{uz} - толщина всей изоляции.

Все данные по толщине этих видов изоляции берутся из соответствующих таблиц в зависимости от номинального напряжения и мощности машины, конструкции и класса нагревостойкости изоляции.(см. гл. 3).
Если эффективный проводник обмотки состоит из двух элементарных проводников, то ширина каждого из них будет равна:

$$b = 0,5 (b_n - \Delta'_{uz}) \quad (9.35)$$

Значения по (9.34) и (9.35) являются предварительными. Окончательная ширина проводника находится по таблице стандартных размеров обмоточных проводов (см. табл. П3.3). Из этой таблицы по предварительно определенной ширине проводника и по его расчетному сечению подбираются наиболее близкие к ним стандартные значения $q_{\text{эл}}$ и b и соответствующая им высота проводника a . Высота проводника при этом не должна превышать 2,5 - 3,0 мм, так как при большей высоте в проводниках, лежащих друг над другом в одном пазу, начинает проявляться эффект вытеснения тока, вызывающий неравномерное распределение плотности тока по сечению проводников и увеличивающий потери в меди обмотки. Действие этого эффекта возрастает с увеличением числа проводников по высоте паза, поэтому в многовитковых катушках высота проводников не должна превышать указанных пределов, а при малом числе витков она может быть выбрана несколько большей.

Слишком малая высота проводников ($a < 1$ мм) вызывает значительные трудности при изготовлении катушек, так как при изгибе проводников на ребро во время намотки катушек могут произойти разрывы провода или его изоляции.

Нежелательно также применение прямоугольных проводов с близкими размерами a и b , так как в этом случае провод во время намотки катушек часто перекручивается и при рихтовке может быть повреждена изоляция на его гранях. Обычно используют провода с отношением размеров $b : a$, близким к 2 : 1

После уточнения размеров проводников составляется подробная спецификация паза (таблица заполнения паза) с указанием размеров проводов, названий, размеров и числа слоев изоляционных материалов, различных прокладок и т. п.

Сумма размеров по высоте и ширине паза всех проводников и изоляции с учетом необходимых допусков на разбухание изоляции и на укладку обмотки определяет размеры части паза, занятой обмоткой.

В боковых стенках верхней части открытых пазов выполняют выемки для крепления пазовых клиньев (см. Рис. 2-1). Глубина выемок под клин, высота шлица $h_{\text{ш}}$ и высота клиновой части паза $h_{\text{к}}$ возрастают с увеличением мощности машины и ширины ее пазов. Обычно в асинхронных двигателях общего назначения $b' - b_{\text{n}} = 2 \dots 5$ мм, $h_{\text{ш}} = 0,5 \dots 1,0$ мм и $h_{\text{к}} = 3 \dots 3,5$ мм в машинах средней мощности и достигает 5 мм в крупных машинах.

Полученные при расчете заполнения паза его размеры являются размерами паза "в свету", т. е. размерами реального паза в собранном шихтованном сердечнике с учетом неизбежной при этом "гребенки", образующейся за счет допусков при штамповке листов и шихтовке магнитопроводов.

Размеры паза "в свету" будут меньше, чем в штампе, т.е. чем размеры паза паза в каждом отдельном листе после штамповки, на величину припусков, указанных в табл. 9.14.

Таблица 9.14. Припуски по ширине и высоте паза

Высота оси вращения h , мм	Припуски, мм	
	по ширине паза Δb_{n}	По высоте паза Δh_{n}
50 – 132	0,1	0,1
160 – 250	0,2	0,2
280 – 355	0,3	0,3
400 – 500	0,4	0,4

Поэтому размеры паза в штампе следующие:

$$\left. \begin{aligned} b_{\text{n}} &= b' + \Delta b_{\text{n}} \\ h_{\text{n}} &= h' + \Delta h_{\text{n}} \end{aligned} \right\} \quad (9.36)$$

где b'_n и h'_n – размеры паза “в свету”, полученные при расчете заполнения паза проводниками обмотки и изоляцией.

После того как размеры паза в штампе окончательно установлены, определяют расчетные размеры зубцов $b_{z\min}$, $b_{z\max}$ или $b_{z1/3}$ и h_z (табл. 9.15).

Таблица 9.15. Расчетные размеры трапецеидальных зубцов статора при открытых и полуоткрытых пазах

Размер	Паз по рис. 9.28, а	Паз по рис. 9.28, б
$b_{z\min}$	$\frac{\pi D}{Z_1} - b_n$	$\pi \frac{D + 2(h_w + h_k)}{Z_1} - b_n$
$b_{z\max}$	$\pi \frac{D + 2h_n}{Z_1} - b_n$	$\pi \frac{D + 2h_n}{Z_1} - b_n$
$b_{z1/3}$	$\pi \frac{D + \frac{2}{3}h_n}{Z_1} - b_n$	$\pi \frac{D + \frac{2}{3}h_n}{Z_1} - b_n$
h_z	h_n	h_n

Обмотку из подразделенных катушек в машинах общего назначения с номинальным напряжением $U \leq 660$ В укладывают в полузакрытые пазы (см. рис. 9.28, б). Ширина шлица паза b_w выбирается из условия обеспечения свободной укладки полукатушек в паз, поэтому $b_w = 0,5 b_n + (1,0 \dots 1,5)$ мм. Высоту шлица и высоту клиновой части паза выполняют в пределах $h_w = 0,6 \dots 0,8$ мм и $h_k = 2,5 \dots 3,5$ мм (большие значения берутся при широких пазах и большей мощности двигателей). Выбор размеров проводников, расчет заполнения паза и определение его размеров “в свету” и в штампе производят так же, как и для открытых пазов. Ширину и расчетную высоту зубцов определяют по формулам табл. 9.15.

Круглые обмоточные провода всыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при всыпных обмотках выбирают таким образом, чтобы параллельные грани имели зубцы, а не пазы статора (рис. 9.29). Такие зубцы имеют постоянное, не изменяющееся с высотой зубца поперечное сечение, индукция в них также не изменяется, и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное напряжение трапецеидальных зубцов, при том же среднем значении индукции в них. Это объясняется отсутствием в зубцах с параллельными гранями участков с высокой индукцией, напряженность поля в которых резко возрастает из-за нелинейности магнитной характеристики стали, увеличивая суммарное магнитное напряжение зубцов.

Обмотку из круглого провода укладывают в пазы одной из приведенных на рис. 9.29, а—в конфигураций. В большинстве современных двигателей, выпускаемых отечественной промышленностью, выполняют трапецеидальные пазы (рис. 9.29, а, б), хотя лучшее заполнение паза достигается в пазах с овальной нижней частью (рис. 9.29, в). Угол наклона грани клиновой части в трапецеидальных пазах у двигателей с $h \leq 250$ мм обычно $\beta = 45^\circ$, при большей высоте оси вращения $\beta = 30^\circ$.

Принцип расчета размеров паза всыпной обмотки остается таким же, как и для пазов с прямоугольными проводами. Сначала проводят предварительный выбор размеров, исходя из допустимой индукции в зубцах и ярме статора,

$$b_{z1} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{B_{zcc} l_{ct1} k_c} \quad (9.37)$$

и h_a по (9.28).

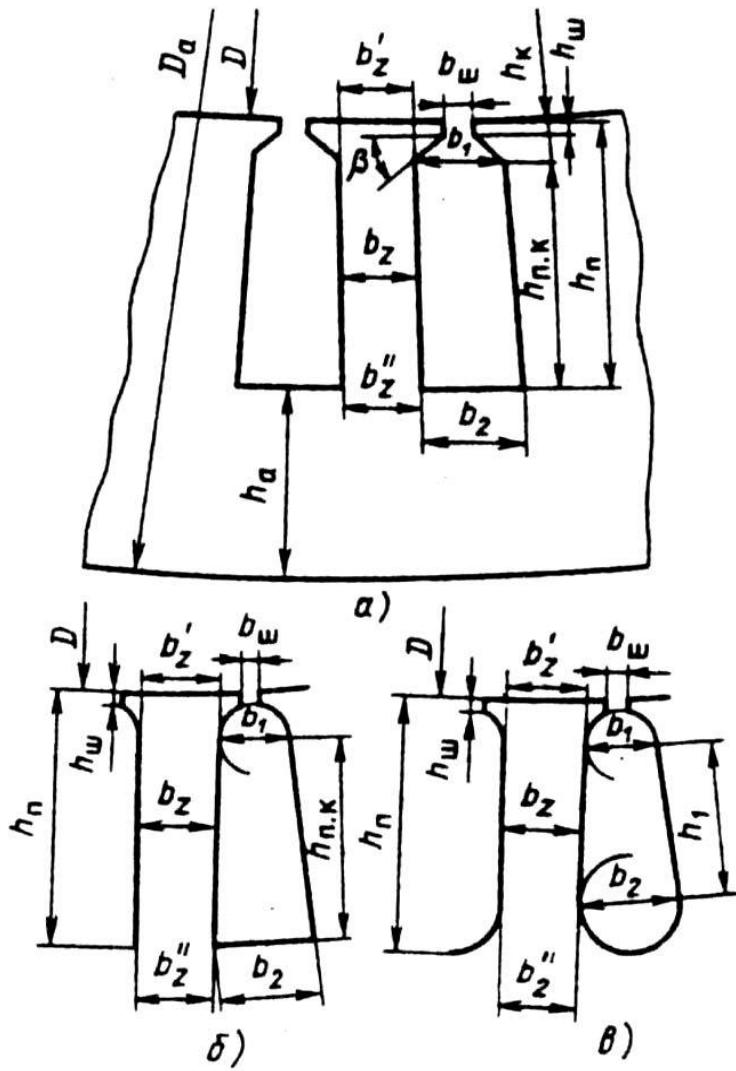


Рис. 9.29. К расчету размеров зубцовой зоны статоров с обмоткой из круглого провода:
а—в — различные конфигурации пазов

В дальнейшем, после расчета коэффициента заполнения паза проводниками обмотки, полученное значение b_{z1} уточняется. Требование выполнить зубцы с параллельными гранями накладывает дополнительные условия на возможные соотношения размеров паза. Это вызывает известные трудности расчета зубцовой зоны, который рекомендуется проводить в следующей последовательности (расчетные формулы приведены только для пазов, показанных на рис. 9.29, а; для других конфигураций они могут быть легко получены, исходя из условия сохранения постоянства ширины зубцов).

По допустимым индукциям в ярме и зубцах статора (см. табл. 9.12) из (9.28) и (9.37) определяют высоту ярма h_a и ширину зубца b_z статора. Далее находят размеры паза в штампе (см. рис. 9.29, а), м,

$$h_n = 0,5 (D_a - D) - h_a \quad (9.38)$$

$$b_2 = (D + 2h_n)/Z_1 - b_{z1} \quad (9.39)$$

Размер b_1 определяют в зависимости от угла β :

при $\beta = 45^\circ$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ш} - b_{ш}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} \quad (9.40)$$

при $\beta = 30^\circ$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ш} - b_{ш}/\sqrt{3}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi/\sqrt{3}} \quad (9.41)$$

Полученные размеры округляют до десятых долей миллиметра.

Высота шлица паза $h_{ш}$ обычно лежит в пределах от 0,5 до 1 мм в зависимости от мощности двигателя. Следует иметь в виду, что $h_{ш}$ должна быть достаточной для обеспечения механической прочности кромок зубцов,держивающих в уплотненном состоянии проводники паза после заклиновки пазов. Однако увеличение $h_{ш}$ приводит к возрастанию потока рассеяния паза, что в большинстве случаев нежелательно. Обычно в двигателях с $h \leq 132$ мм принимают $h_{ш} = 0,5$ мм, в двигателях с $h \geq 160$ мм увеличивают до $h_{ш} = 1$ мм.

Ширину шлица паза в статорах, рассчитанных на укладку обмотки вручную, принимают равной $b_{ш} = d_{из} + (1,5...2)$ мм, где $d_{из}$ - диаметр изолированного обмоточного провода, мм. Размер $b_{ш}$ должен обеспечить возможность свободного пропуска проводников обмотки через шлиц с учетом толщины изоляционных технологических прокладок, устанавливаемых при укладке обмотки для предохранения изоляции проводников от повреждений об острые кромки шлица.

В машинах с однослойной, одно-двухслойной или с двухслойной концентрической обмоткой, в которых укладка обмотки механизирована, ширину шлица паза выполняют несколько большей. При совмещенном методе укладки ширина шлица паза, мм,

$$b_{ш} = d_{из} + (1,8...2,3).$$

При раздельном методе $b_{ш}$ еще более увеличивают в зависимости от размеров штыревой оправки, применяемой для втягивания катушек обмотки в пазы, диаметра провода и коэффициента заполнения паза.

Проектируя серии асинхронных двигателей, размер $b_{ш}$ нормализуют. В сериях 4А и АИ он выполняется равным от 1,8 мм в машинах малой мощности и до 4 мм в более крупных. Средние значения $b_{ш}$ для двигателей при различных h и $2p$ приведены в табл. 9.16.

Таблица 9.16. Средние значения ширины шлица полузакрытых пазов статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода $b_{ш}$, мм

A, мм	Число полюсов двигателя $2p$				
	2	4	6-8	10	12
50-63	1,8	1,8	1,8	-	-
71	2	2	2	-	-
80-90	3	3	2,7	-	-
100,112	3,5	3,5	3	-	-
132	4	3,5	3,5	-	-
160-250	4	3,7	3,7	-	-
280-315	-	-	-	4	4

В клиновой части паза располагают пазовые крышки (в машинах с $h \leq 160$ мм), а в более крупных машинах — пазовые клинья. Поэтому при расчете площади поперечного сечения паза, используемой для размещения обмотки, эти участки не учитывают. Размеры паза, при которых обеспечивается параллельность боковых граней зубцов, могут быть определены также графоаналитическим методом. Его удобно применять, если конфигурация пазов отличается от рассмотренной трапецидальной, для которой приведены аналитические выражения (9.38)–(9.41). Графоаналитический расчет выполняют в следующей последовательности.

Вначале строят равнобедренную трапецию (рис. 9.30, а), верхнее основание которой равно в выбранном масштабе пазовому делению t_{z1} , нижнее основание $t'_{z1} = t_{z1} D_a / D$, а высота $h = (D_a - D) / 2$. Такая трапеция представляет собой как бы вырезанный из листа статора сектор пазового деления, в котором должны разместиться паз (ось паза совпадает с осью трапеции), прилегающие к нему с обеих сторон половины сечений зубцов и участок ярма статора. По допустимым индукциям B_{z1} и B_a определяют ширину зубца по (9.37) и высоту ярма по (9.28). На построенной трапеции линиями, параллельными ее боковым граням, отсекают участки шириной $0,5b_z$ и линией, параллельной ее основаниям, — участок шириной h_a (рис. 9.30, б). В оставшуюся часть трапеции (рис. 9.30, б — не заштрихована) вписывают контур паза выбранной конфигурации (рис. 9.30, в). Его основные размеры b_1 , b_2 и h_π обеспечивают параллельность боковых граней зубцов при наименьших возможных, с точки зрения допустимой индукции, размерах зубцов и ярма.

Для достижения достаточной точности построение должно быть выполнено в крупном масштабе, при котором возможна достоверность определения размеров паза с точностью до 0,1 мм, например 10:1 или 5:1.

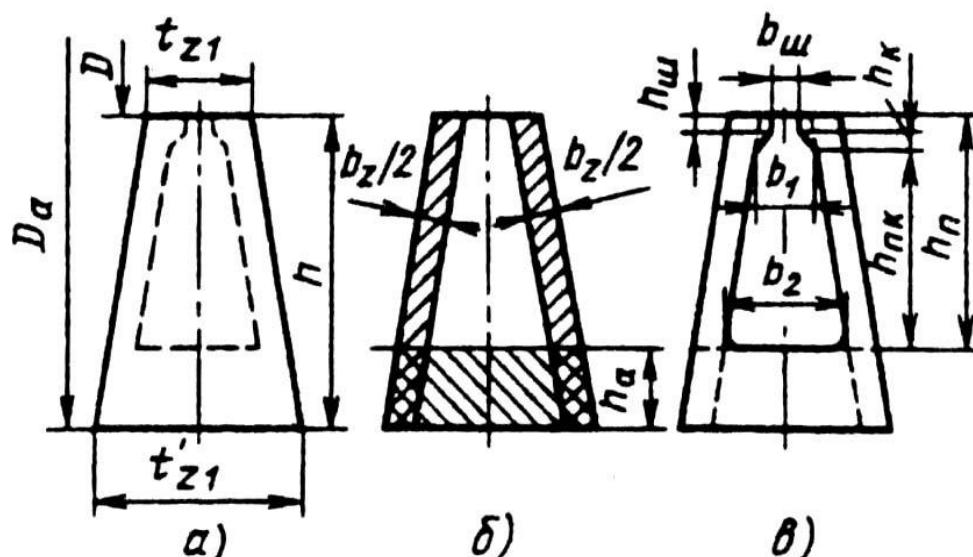


Рис. 9.30. К графоаналитическому методу определения размеров паза статора

Для расчета коэффициента заполнения паза необходимо определить площадь паза “в свету” и учесть площадь поперечного сечения паза, занимаемую корпусной изоляцией $S_{из}$ и прокладками в пазу $S_{пр}$. Размеры паза “в свету” определяют с учетом припусков на шихтовку сердечников Δb_π и Δh_π :

$$\left. \begin{array}{l} b'_1 = b_1 - \Delta b_n \\ b'_2 = b_2 - \Delta b_n \\ h'_n = h_n - \Delta h_n \end{array} \right\} \quad (9.42)$$

где Δb_n и Δh_n — см. табл. 9.14.

Площадь поперечного сечения трапецидального паза, в которой размещаются обмотка, корпусная изоляция и прокладки, m^2 ,

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{n,k} \quad (9.43)$$

где

$$h'_{n,k} = h'_n - (h_{u3} + h_k) \quad (9.44)$$

высота клиновой части паза $h_k = (b_1 - b_{III}) \operatorname{tg} \beta / 2$, т. е.

$$\left. \begin{array}{l} h_k = (b_1 - b_{III}) / 2 \dots \text{при } \beta = 45^\circ \\ h_k = (b_1 - b_{III}) / 2\sqrt{3} \dots \text{при } \beta = 30^\circ \end{array} \right\} \quad (9.45)$$

Площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу, m^2 ,

$$S_{u3} = b_{u3}(2h_n + b_1 + b_2), \quad (9.46)$$

где b_{u3} — односторонняя толщина изоляции в пазу, м (см. гл. 3).

Площадь, занимаемая прокладками в пазу (на дне паза, под клином и между слоями обмотки в двухслойной обмотке), m^2 ,

$$\begin{aligned} &\text{для двигателей с } h = 180 \dots 250 \text{ мм} \\ &S_{np} = (0,9 b_1 + 0,4 b_2) 10^{-3}; \end{aligned} \quad (9.47)$$

$$\begin{aligned} &\text{для двигателей с } h \geq 280 \text{ мм} \\ &S_{np} = 0,6 (b_1 + b_2) 10^{-3} \end{aligned}$$

При отсутствии прокладок в пазу $S_{np} = 0$.

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся свободной для размещения проводников обмотки,

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{n,k} - (S_{u3} + S_{np}). \quad (9.48)$$

Контролем правильности размещения обмотки в пазах является значение коэффициента заполнения паза:

$$k_3 = (d_{u3}^2 u_n n_{el}) / S'_n$$

(см. § 3.4), который должен находиться в пределах $k_3 = 0,69 \dots 0,71$ для двигателей с $2p = 2$ и $k_3 = 0,72 \dots 0,74$ для двигателей с $2p \geq 4$.

Если полученное значение ниже указанных пределов, то площадь паза следует уменьшить за счет увеличения h_a или b_z , или обоих размеров одновременно в зависимости от принятого при их расчете значения индукции. Индукция в зубцах и ярме статора при этом уменьшится. Уменьшение индукции ниже пределов, указанных в табл. 9.12, показывает, что главные размеры двигателя завышены и активная сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника или перейти на ближайшую меньшую высоту оси вращения.

Часто расчет показывает, что значение k_3 оказывается выше указанных пределов. Это недопустимо, так как при чрезмерно высоких k_3 проводники обмотки во время укладки приходится очень сильно уплотнять в пазах. Их изоляция может быть повреждена или, по меньшей мере, ослаблена, что вызовет резкое уменьшение надежности обмотки. Для уменьшения k_3 надо, взяв предельно допустимые значения B_z и B_a (см. табл. 9.12), пересчитать размеры b_z и h_a . К уменьшению k_3 приводит также уменьшение числа элементарных проводников $n_{эл}$, которое возможно при одновременном пропорциональном увеличении площади поперечного сечения $q_{эл}$ или уменьшении числа параллельных ветвей обмотки с тем, чтобы плотность тока осталась неизменной. Если и при этом значение k_3 остается выше допустимого, следует сделать вывод, что принятые главные размеры двигателя занижены. Необходимо просчитать другой вариант, увеличив 1 или перейдя на большую высоту оси вращения.

Таблица 9. 17. Расчетные размеры зубцов статоров при трапециoidalных или грушевидных пазах в машинах с обмоткой из круглого провода

Размер	Рис. 9.29, а	Рис. 9.29, б	Рис. 9.29, в
b_z'	$\pi \frac{D + 2(h_{ш} + h_{к})}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D + 2h_{ш} + b_1}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D + 2h_{ш} + b_1}{Z} - b_1$
b_z''	$\pi \frac{D + 2h_{ш}}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D + 2h_{ш}}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D + 2h_{ш} - b_2}{Z} - b_2$
h_z	$h_{ш}$	$h_{ш}$	$h_{ш} - 0,1 b_2$

После уточнения размеров паза ширину зубца и расчетную высоту паза определяют по формулам табл. 9.17. Обычно при всыпной обмотке $b_z = b'_z = b''_z$. В некоторых случаях возможно некоторое расхождение значений b'_z и b''_z , поэтому рекомендуется рассчитать оба значения b'_z и b''_z и при небольшом расхождении результатов взять среднюю расчетную ширину зубца: $b_z = (b'_z + b''_z)/2$. При больших расхождениях следует изменить соотношения размеров пазов.

9.7. ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Правильный выбор воздушного зазора во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающие тока двигателя, благодаря чему возрастает его $\cos \phi$ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше.

В современных асинхронных двигателях зазор выбирают, исходя из минимума суммарных потерь. Так как при увеличении зазора потери в меди возрастают, а поверхностные и пульсационные уменьшаются, то существует оптимальное соотношение между параметрами, при котором сумма потерь будет наименьшей. Такие расчеты проводят на ЭВМ по оптимизационным программам. При учебном проектировании воздушный зазор следует выбирать, руководствуясь данными выпускаемых двигателей (рис. 9.31) либо следующими приближенными формулами.

Для двигателей мощностью менее 20 кВт воздушный зазор, м, равен при $2p = 2$

$$\delta \approx (0,3 + 1,5D) 10^{-3}; \quad (9.49)$$

при $2p > 4$

$$\delta \approx (0,25 + D) 10^{-3}. \quad (9.50)$$

Для двигателей средней и большой мощности

$$\delta \approx \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) 10^{-3} \quad (9.51)$$

Поверхностные и пульсационные потери в двигателях зависят не только от амплитуд, но и от частоты пульсаций индукции в воздушном зазоре. В быстроходных двигателях частота пульсаций больше, чем в тихоходных, так как она пропорциональна частоте вращения.

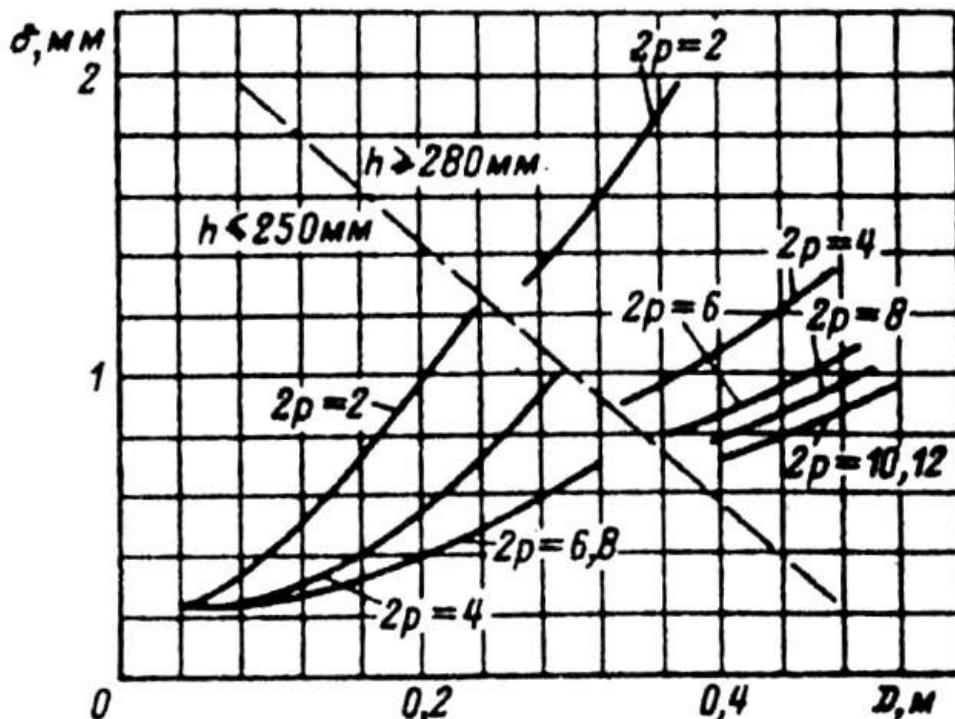


Рис. 9.31. К выбору воздушного зазора асинхронных двигателей

Для уменьшения этого вида потерь в быстроходных двигателях выполняют большим, что уменьшает амплитуду пульсаций.

В статорах высоковольтных машин применяют только открытые пазы, и при малых зазорах это может привести к большим пульсациям индукции, поэтому воздушный зазор в них выполняют большим, обычно равным 1,5...2 мм.

Воздушный зазор, полученный по эмпирическим формулам или из графиков, следует округлять до 0,05 мм при $\delta < 0,5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0,5$ мм. Например, зазор выбирают равным 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 мм и т. д.

Выбранный по приведенным рекомендациям воздушный зазор обычно превышает минимально допустимый по механическим условиям. Однако все же необходимо провести механический расчет вала проектируемого двигателя. Прогиб вала не должен быть больше 10 % воздушного зазора.

9.8. РАСЧЕТ РОТОРА

9.8.1. Фазные роторы

Для нормальной работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы фазная обмотка ротора имела столько же фаз и столько же полюсов, сколько их имеет обмотка статора, т. е. $m_2 = m_1$ и $p_2 = p_1$.

Число пазов ротора Z_2 должно отличаться от числа пазов статора. При расчете задаются обычно числом пазов на полюс и фазу ротора $q_2 = q_1 \pm K$, тогда $Z_2 = Z_1 q_2/q_1$. В большинстве случаев $K = 1$ или $K = 1/2$. При характерном для обмоток статора асинхронных двигателей целом q_1 обмотка ротора имеет целое или дробное число q_2 со знаменателем дробности, равным 2. Обмотки ротора со знаменателем дробности, большим двух, встречаются редко (в основном в крупных многополюсных машинах).

Число витков в фазе обмотки ротора выбирают исходя из допустимого напряжения на контактных кольцах при пуске двигателя. ЭДС фазы обмотки ротора E_2 определяется магнитным потоком, который при постоянном уровне индукции в воздушном зазоре растет с увеличением габаритов двигателя. Поэтому в крупных машинах напряжение на контактных кольцах может достигнуть слишком большого значения и привести к перекрытию или пробою изоляции колец.

Чтобы E_2 не достигала опасного значения, обмотку роторов крупных машин выполняют с малым числом витков в фазе. В современных асинхронных двигателях наиболее распространенной обмоткой такого типа является двухслойная стержневая обмотка, при которой в пазу размещаются только два эффективных проводника. Для уменьшения количества межгрупповых соединений она выполняется волновой.

В отдельных машинах можно встретить и однослойную стержневую обмотку ротора. Она применяется как исключение в крупных машинах специального исполнения, так как требует сложной в технологическом отношении конструкции лобовых частей стержней.

В небольших по габаритам машинах опасности чрезмерного увеличения E_2 нет, так как поток в них невелик, и число витков в фазе обмотки ротора увеличивают, чтобы снизить ток через щеточные контакты, что особенно важно в двигателях с постоянно прилегающими к контактным кольцам щетками. Такие обмотки выполняют из многовитковых катушек. Описание конструкции и схем обмоток фазных роторов дано в гл. 3.

Расчет обмотки фазного ротора проводят в следующей последовательности.

Для определения числа витков в фазе роторов с катушечной обмоткой предварительно задаются ЭДС фазы E_2 , при которой напряжение на контактных кольцах ($U_{к.к.}$) в момент пуска двигателя приблизительно равно линейному номинальному напряжению двигателя. Обмотки роторов в большинстве случаев соединяют в звезду

при этом $U_{к.к.} = \sqrt{3} E_2 = 150...250$ В. Если обмотку ротора соединяют в треугольник, то $U_{к.к.} = E_2$.

Число витков в фазе

$$w_2 = \frac{E_2}{4k_b k_{o\bar{o}2} f_2 \Phi} = \frac{E_2}{k_E k_{1n.o.m}} \frac{f_1}{f_2} w_1 \frac{k_{o\bar{o}1}}{k_{o\bar{o}2}}$$

Так как E_2 выбрана приближенно и может быть несколько изменена, то, принимая отношение обмоточных коэффициентов $k_{o61}/k_{o62} = 1$ и $k_E = 1$ и учитывая, что при $s = 1$ отношение $f_1/f_2 = 1$, получаем

$$w_2 = \frac{E_2}{U_{1_{hom}}} w_1 \quad (9.52)$$

Число эффективных проводников в пазу

$$U_{n2} = \frac{2w_2 E_2}{Z_2} = \frac{w_2}{p_2 q_2} \quad (9.53)$$

должно быть целым и при двухслойной обмотке четным, поэтому полученное значение округляют, после чего уточняют число витков в фазе:

$$w_2 = u_n p_2 q_2. \quad (9.54)$$

В роторах с двухслойной стержневой обмоткой u_{n2} всегда равно двум, поэтому w_2 определяют без предварительного выбора E_2 :

$$w_2 = 2 p_2 q_2 = Z_2 / m_2. \quad (9.55)$$

После расчета w_2 необходимо проверить напряжение на контактных кольцах ротора:

$$U_{k.k.} = \sqrt{3} U_{1_{hom}} \frac{W_2}{W_1} \quad (9.56)$$

В двигателях со стержневой обмоткой ротора $U_{k.k.}$ обычно не превышает 800... 1000 В, но при расчете двигателей мощностью 1000 кВт и более могут быть получены значения $U_{k.k.}$ более 1500... 2000 В. Для снижения $U_{k.k.}$ в обмотке ротора иногда выполняют две параллельные ветви. При этом необходимо помнить, что стержневая волновая обмотка с $a = 2$ может быть выполнена симметричной только при целом числе q_2 .

Предварительное значение тока в обмотке фазного ротора, А,

$$I_2 = k_i I_1 v_i, \quad (9.57)$$

где k_i — коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение I_1 / I_2 . Его приближенное значение может быть рассчитано в зависимости от номинального $\cos \varphi$, которым задавались в начале расчета:

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi, \quad (9.58)$$

v_i — коэффициент приведения токов, для двигателей с фазными роторами

$$v_i = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}}. \quad (9.59)$$

Сечение эффективных проводников обмотки ротора, м²,

$$q_{\phi 2} = I_2 / J_2, \quad (9.60)$$

и при стержневой обмотке $q_c = q_{\phi 2}$. Здесь J_2 — допустимая плотность тока, А/м²; в роторах с катушечной обмоткой при классах нагревостойкости изоляции В и F $J_2 = (5...6,5) \cdot 10^6$ А/м, а в более мощных двигателях со стержневой обмоткой $J_2 = (4,5...5,5) \cdot 10^6$ А/м².

Эффективные проводники независимо от их размеров на элементарные не подразделяют, так как эффект вытеснения тока в обмотке роторов при номинальных режимах асинхронных двигателей из-за малой частоты ($f_2 = sf_1$) не проявляется.

Окончательные размеры проводников обмотки ротора определяют по таблицам приложения 3 одновременно с расчетом размеров пазов.

В фазных роторах с катушечной обмоткой выполняют прямоугольные открытые пазы, при стержневой обмотке — прямоугольные полузакрытые пазы с узким шлицем (рис. 9.32). Ширину паза выбирают исходя из соотношения $(0,4...0,45)t_{z2}$. Примеры вычисления изоляции обмоток фазных роторов приведены в табл. 3.10 и 3.11.

При расчете заполнения паза проводниками с изоляцией следует учитывать припуск на сборку магнитопровода (см. табл. 9.14). Высоту клиновой части паза при расчете расположения проводников не учитывают. В двигателях с $h = 280...355$ мм выполняют $h_k = 2,5$ мм и $h_k = 3,5$ мм при $h = 400$ мм. Ширину шлица обычно принимают равной $b_{sh} = 1,5$ мм, а высоту $h_{sh} = 1,0$ мм.

После предварительных расчетов необходимо уточнить размер зубца ротора в наиболее узком сечении b_{z2min} и проверить соответствие индукции B_{z2max} ее допустимому значению для данного исполнения двигателя по табл. 9.12:

$$b_{z2min} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{n2})}{Z_2} - b_{n2}; \quad (9.61)$$

$$B_{z2max} = \frac{B_\delta t_{z2} l_\delta}{b_{z2min} l_{CT2} k_k} \quad (9.62)$$

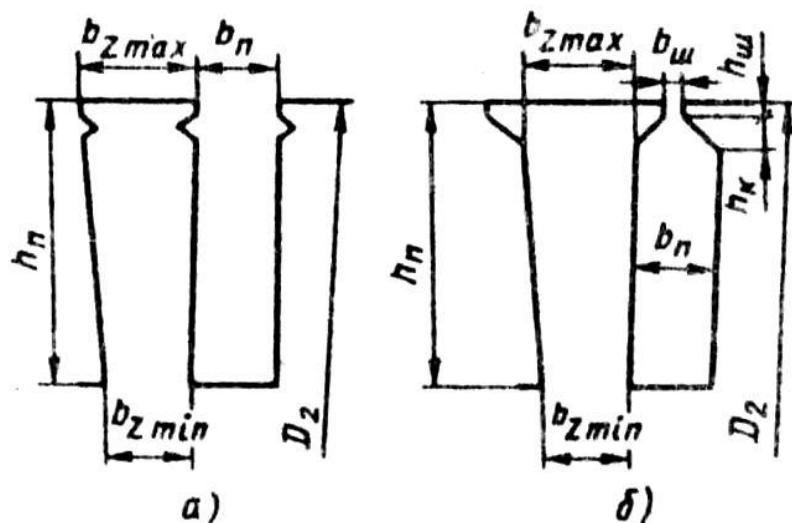


Рис. 9.32. Пазы фазного ротора асинхронного двигателя:

- а — открытые (катушечная обмотка);
б — полузакрытые (стержневая обмотка)

Наибольшая ширина зубца ротора с открытыми пазами (рис. 9.32, а)

$$b_{z2max} = \frac{\pi D_2}{Z_2} - b_{n2}; \quad (9.63)$$

Наибольшая ширина зубца ротора с полузакрытыми пазами (рис. 9.32, б)

$$b_{z2max} = \pi \frac{D_2 - 2(h_u + h_k)}{Z_2} - b_{n2} \quad (9.64)$$

Расчетная высота зубцов при пазах обеих конфигураций принимается равной высоте паза.

9.8.2. Короткозамкнутые роторы

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей делятся по конструкции и технологии изготовления на два типа: сварные и литые.

В сварных конструкциях (рис. 9.33 и 9.34) стержни обмотки устанавливают в пазы, после чего с торцов ротора их замыкают, приваривая или припаивая замыкающие кольца. При литых конструкциях одновременно заливают как одно целое и стержни, и замыкающие кольца. На

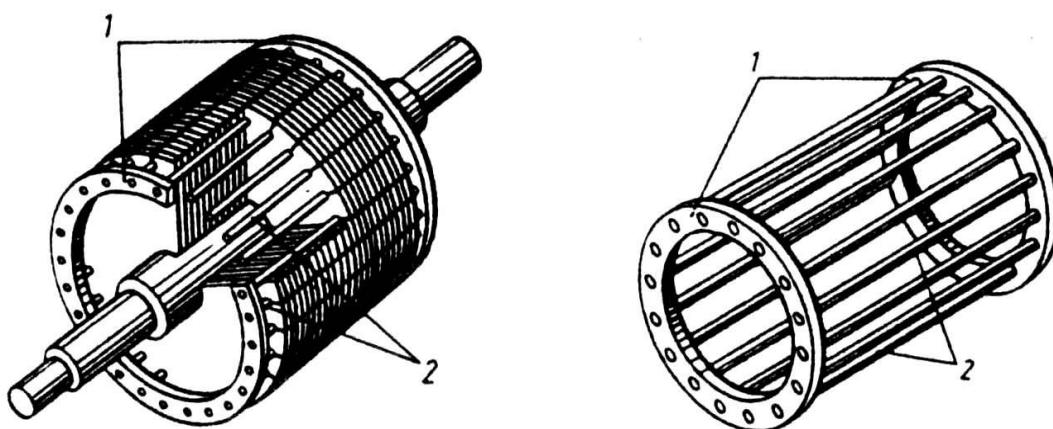


Рис. 9.33. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя со сварной обмоткой: 1 — замыкающие кольца; 2 — стержни обмотки

Рис. 9.34. Короткозамкнутая обмотка асинхронного двигателя:
1 — замыкающие кольца;
2 — стержни обмотки

замыкающих кольцах отливают также вентиляционные лопатки, выполняющие роль вентилятора при работе машины (см. рис. 3.10).

Короткозамкнутые обмотки роторов, в отличие от всех других существующих обмоток, не имеют определенного числа фаз и числа полюсов. Один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых выполнены на различные числа полюсов. Это, в частности,

определенность использования короткозамкнутых роторов в двигателях с регулированием частоты вращения путем переключения числа полюсов обмотки статора.

Обычно принято считать, что каждый стержень обмотки образует одну фазу короткозамкнутой обмотки. Тогда число ее фаз равно числу пазов ($m_2 = Z_2$) и обмотка каждой из фаз имеет 1/2 витка, т. е. $w_2 = 1/2$, так как при $m_2 = Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора (рис. 9.35). Обмоточный коэффициент такой обмотки равен единице, а условное число пазов на полюс и фазу

$$q_2 = \frac{Z_2}{2 p_2 m_2} = \frac{1}{2 p_2}. \quad (9.65)$$

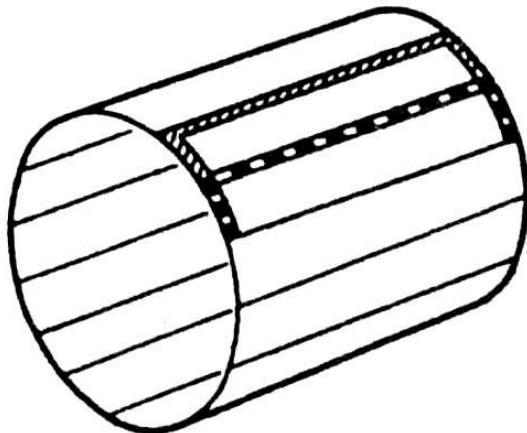


Рис. 9.35. Фазы обмотки короткозамкнутого ротора

При проектировании зубцовой зоны короткозамкнутых роторов особое внимание следует уделять выбору числа пазов ротора. Это объясняется тем, что в поле воздушного зазора машины кроме основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты, которые при неблагоприятном соотношении Z_1 и Z_2 могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя, так как момент на валу машины является суммой моментов, обусловленных всеми взаимодействующими гармониками. В зависимости от соотношения Z_1 и Z_2 в той или иной степени проявляются синхронные или асинхронные моменты от высших гармоник.

Их влияние на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента [6]. В поле зазора присутствуют также высшие гармоники, порядок которых определенным образом связан с числами пазов и полюсов машины. Это так называемые зубцовые гармоники, которые вызывают шум и вибрацию при работе двигателя при номинальном режиме. Влияние зубцовых гармоник особенно заметно при малых воздушных зазорах, характерных для асинхронных двигателей небольшой мощности.

Исследования, проведенные для изучения влияния соотношений чисел зубцов на статоре и роторе на кривую момента, а также на шумы и вибрации, позволили определить наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых двигателей с различными числами $2p$. Рекомендации по выбору Z_2 при известных Z_1 и $2p$ сведены в табл. 9.18, в которой предлагается несколько возможных вариантов чисел пазов ротора при данных Z и $2p$. В двигателях малой мощности

обычно выполняют $Z_2 < Z_1$. Это объясняется рядом причин технологического характера, а также тем, что с увеличением Z_2 ток в стержнях ротора уменьшается, и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малыми. В более крупных двигателях иногда выполняют $Z_2 > Z_1$, с тем чтобы ограничить чрезмерно большой ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки по длине расточки.

Таблица 9.18. Рекомендуемые числа пазов роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

2p	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		без скоса пазов	со скосом пазов
2	12	9*, 15*	—
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
	24	15* (16)*, 17*, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40, 25, 27, 29, 43,
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	12	9*	15*
	18	10*, 14*	18*, 22*
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
6	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
	54	44, 50, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
8	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
10	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163

Примечания: 1. В скобках указаны числа пазов, при которых возможно повышение вибрации двигателей.

2. Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые, в основном, в машинах малой мощности.

Ток в стержне определяется по (9.57), при этом с учетом принятых для короткозамкнутой обмотки чисел фаз и витков в фазе, а также влияния скоса пазов коэффициент приведения токов

$$\nu_i = \frac{m_1 w_1 k_{OB1}}{m_2 w_2 k_{OB2} k_{CK}} = \frac{2 m_1 w_1 k_{OB1}}{Z_2 k_{CK}} \quad (9.66)$$

где k_{CK} — коэффициент скоса, учитывающий уменьшение ЭДС обмотки при скосенных пазах ротора (см. гл. 3):

$$k_{CK} = \frac{2 \sin(\gamma_{CK}/2)}{\gamma_{CK}}, \quad (9.67)$$

здесь $y_{CK} = \beta_{CK} \frac{2p}{Z}$; $\beta_{CK} = \frac{b_{CK}}{t_{z2}}$; b_{CK} — скос пазов, мм.

Сечение стержней, м²,

$$q_c = I_2/J_2. \quad (9.68)$$

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием выбирается в пределах $J_2 = (2,5...3,5) \cdot 10^6$ А/м², а при защищенном исполнении на 10...15 % выше, при этом для машин больших мощностей следует принимать меньшие значения плотности тока.

В обмотке ротора, выполненной из медных стержней, плотность тока принимают несколько большей: $J_2 = (4,0...8,0) \cdot 10^6$ А/м² (большие значения соответствуют машинам меньшей мощности).

Ток в короткозамыкающих кольцах находят, исходя из следующих соображений. Принимают направления токов в стержнях ротора $\dot{I}_{c1}, \dot{I}_{c2}, \dot{I}_{c3} \dots$ и на участках замыкающих колец, соединяющих эти стержни, $\dot{I}_{12}, \dot{I}_{23}, \dot{I}_{34}$, как показано на рис. 9.36, а. Тогда для узлов а, б, с и т. д. можно записать

$$\begin{aligned} \dot{I}_{c2} &= \dot{I}_{12} - \dot{I}_{23}; \\ \dot{I}_{c3} &= \dot{I}_{23} - \dot{I}_{34}; \\ \dot{I}_4 &= \dot{I}_{34} - \dot{I}_{45}. \end{aligned} \quad (9.69)$$

.....

Токи в стержнях сдвинуты относительно друг друга на угол $a_z = 2\pi / Z_2$. Начертив многоугольник токов в стержнях (рис. 9.36, б), стороны которого являются векторами токов стержней, сдвинутых по фазе на угол a_z , убеждаемся, что системе уравнений (9.69) будут соответствовать направления токов на участках колец, показанные на рис. 9.36, б. Угол между их векторами тоже равен a_z . Найдем соотношение между токами в стержнях и в участках

колец, для чего рассмотрим один из треугольников векторной диаграммы, образованный, например, векторами токов $\dot{I}_{12}, \dot{I}_{23}, \dot{I}_{c_2}$. Из этого треугольника имеем

$$\dot{I}_{c_2} = 2 \dot{I}_{23} \sin \frac{\alpha_z}{2}.$$

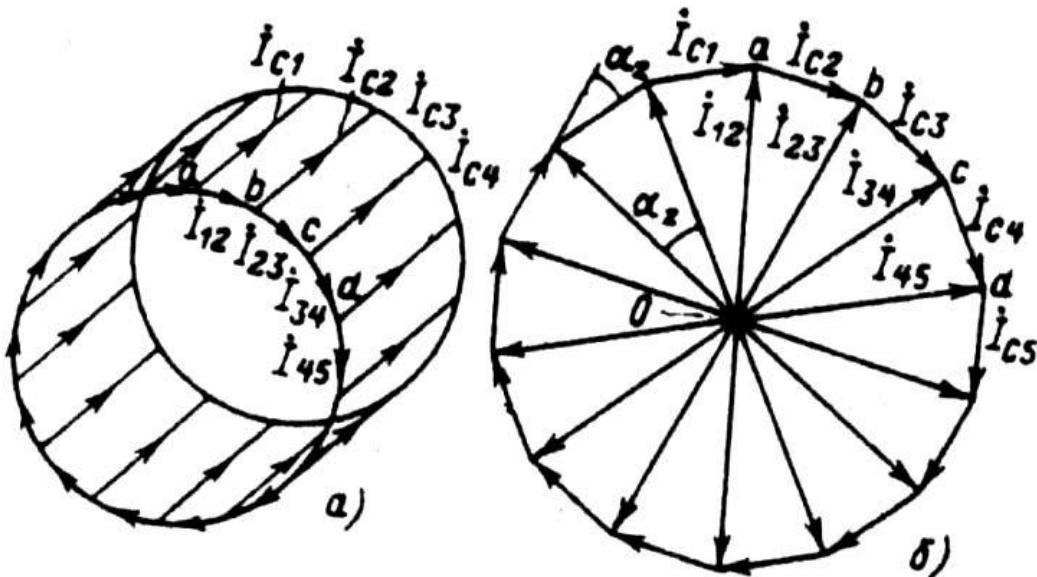


Рис. 9.36 К расчету токов в замыкающих кольцах короткозамкнутой обмотки ротора:

- а — направления токов;
- б — векторная диаграмма токов обмотки

Так как это соотношение справедливо для любого из элементов обмотки, обозначив токи в кольце I_{kl} , а токи в стержнях I_2 , можем записать

$$I_{kl} = I_2/\Delta, \quad (9.70)$$

где

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha_z}{2} = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}. \quad (9.71)$$

Выражение (9.70) является расчетной формулой для определения тока в замыкающих кольцах короткозамкнутых роторов.

Плотность тока в замыкающих кольцах J_{kl} выбирают в среднем на 15...20 % меньше, чем в стержнях. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, замыкающие кольца, имеющие лучшие условия охлаждения по сравнению со стержнями, являются своего рода радиаторами, которые отводят тепло стержней, усиливая их охлаждение. Во-вторых, в машинах, в которых для улучшения пусковых характеристик используют эффект вытеснения тока, большое сопротивление замыкающих колец снижает кратность увеличения общего сопротивления обмотки ротора при пуске.

Площадь поперечного сечения замыкающих колец, м^2 ,

$$q_{kl} = I_{kl}/J_{kl}. \quad (9.72)$$

Замыкающие кольца в роторах со вставными стержнями из-за необходимости пайки или сварки их со стержнями устанавливают на некотором расстоянии от торцов ротора (рис. 9.37, а). Поперечное сечение колец представляет собой прямоугольник, размеры которого (h_{kl} и b_{kl}) выбирают таким образом, что $h_{kl} = (1,1...1,25)h_{n2}$.

В роторах с литой обмоткой замыкающие кольца, которые отливают одновременно с заливкой пазов, всегда плотно прилегают к торцам сердечника ротора. При этом они помимо своей основной функции выполняют и другую: удерживают в спрессованном состоянии листы сердечника ротора. Замыкающие кольца литой обмотки обычно выполняют с поперечным

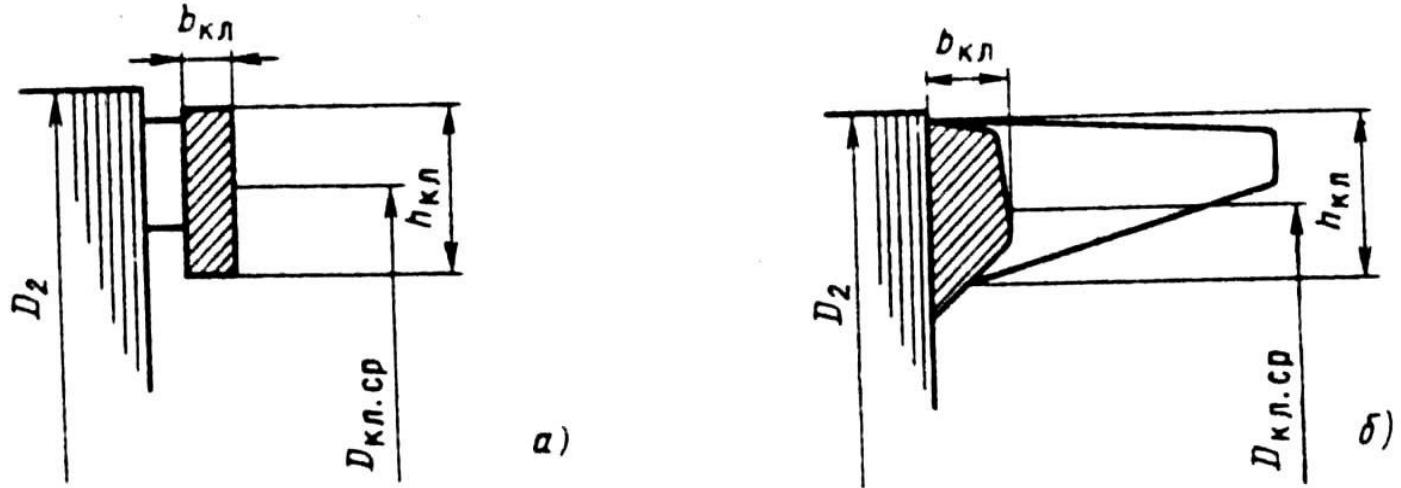


Рис. 9.37. Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора:
а — со сварной обмоткой; б — с литой обмоткой

сечением в виде неправильной трапеции, прилегающей своим большим основанием к торцу ротора (рис. 9.37, б). Размеры h_{kl} и b_{kl} , нужные для расчета, берут приближенно, исходя из конфигурации поперечного сечения кольца. Высоту сечения кольца выбирают $h_{kl} \geq 1,2 h_{n2}$.

Ширину замыкающих колец обоих типов рассчитывают исходя из q_{kl} полученной по (9.72), и выбранной h_{kl} :

$$b_{kl} = q_{kl}/h_{kl}. \quad (9.73)$$

Средний диаметр замыкающих колец, м,

$$D_{kl.cp} = D_2 - h_{kl}. \quad (9.74)$$

Одновременно с заливкой стержней и колец на замыкающих кольцах отливают вентиляционные лопатки длиной, несколько меньшей, чем длина вылета лобовых частей обмотки статора. Количество вентиляционных лопаток выбирают равным простому числу, приблизительно в 2—3 раза меньшему, чем число пазов ротора.

Расчетное сечение замыкающих колец литой обмотки, м^2 , принимают равным $q_{kl} = h_{kl} b_{kl}$, не учитывая утолщения в местах примыкания вентиляционных лопаток.

Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым характеристикам двигателя и его мощностью. В асинхронных двигателях мощностью до 50...60 кВт обычно выполняют грушевидные пазы и литую обмотку из алюминия (рис. 9.38, а). Размеры паза выбирают такими, чтобы торцы ротора имели параллельные грани.

Роторы более крупных машин с прямоугольными пазами выполняют со вставными медными стержнями или с литой алюминиевой обмоткой (рис. 9.38, в, г). Прямоугольные открытые пазы встречаются в короткозамкнутых роторах многополюсных асинхронных двигателей. Стержни обмотки, выполненные из алюминиевых шин прямоугольного сечения (рис. 9.38, д), устанавливают в открытые пазы ротора и закрепляют, расчеканивая их верхнюю часть.

Для увеличения пусковых моментов двигателей прямоугольные пазы делают узкими и глубокими, так как эффект вытеснения тока в них возрастает с увеличением высоты стержня. Роторы с такими пазами называют глубокопазными.

В асинхронных двигателях при небольшом числе полюсов часто не удается получить требуемый пусковой момент даже при глубокопазных роторах, поэтому переходят к роторам с фигурными пазами. Применяют различные конфигурации фигурных пазов (рис. 9.38, е – и). Все они имеют характерную особенность – уменьшенную ширину верхней части паза по сравнению с нижней, что позволяет в большей степени использовать эффект вытеснения тока при больших скольжениях.

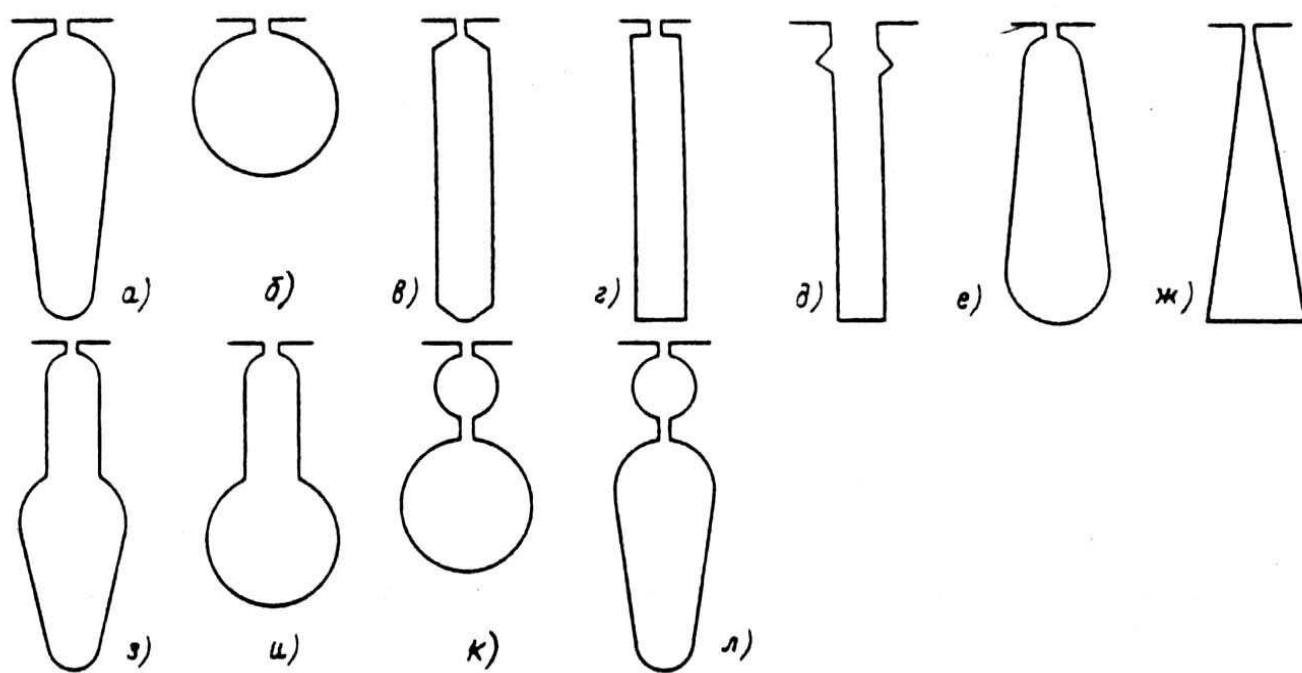


Рис. 9.38. Конфигурации пазов короткозамкнутых асинхронных двигателей

Короткозамкнутые обмотки роторов с пазами трапецидальной формы выполняют как с заливкой пазов алюминием (рис. 9.38, ё), так и со сварной медной клеткой (рис. 9.38, ж), для стержней которой используют шинную медь соответствующего профиля.

Обмотки со стержнями более сложной формы, например, лопаточные стержни (рис. 9.38, з), выполняют заливкой алюминием или его сплавами. Колбообразные пазы с круглой нижней частью (рис. 9.38, и) в настоящее время почти не применяют из-за менее удачного, чем при лопаточных пазах, использования стали зубцовой зоны.

Асинхронные двигатели, предназначенные для приводов механизмов с тяжелыми условиями пуска, часто выполняют с двухклеточными роторами (рис. 9.38, к, л), в которых на каждом зубцовом делении размещены один над другим два стержня. Каждая система стержней

образует свою обмотку: верхние стержни, лежащие ближе к зазору, — пусковую, а нижние — рабочую.

Двойную клетку выполняют в двух вариантах: с общими замыкающими кольцами (рис. 9.39, а), когда каждое кольцо замыкает одновременно стержни и пусковой, и рабочей клеток, либо с раздельными замыкающими кольцами (рис. 9.39, б). В последнем случае с каждого торца ротора располагают по два кольца, одно из которых замыкает только стержни пусковой, а другое — стержни рабочей клетки.

Обычное исполнение двойной клетки — сварное с раздельными кольцами. Рабочую обмотку (стержни и короткозамыкающие кольца) в большинстве случаев изготавливают из меди, а пусковую — из латуни. Латунь для пусковой клетки применяют из-за больших по сравнению с медью удельного сопротивления и теплоемкости.

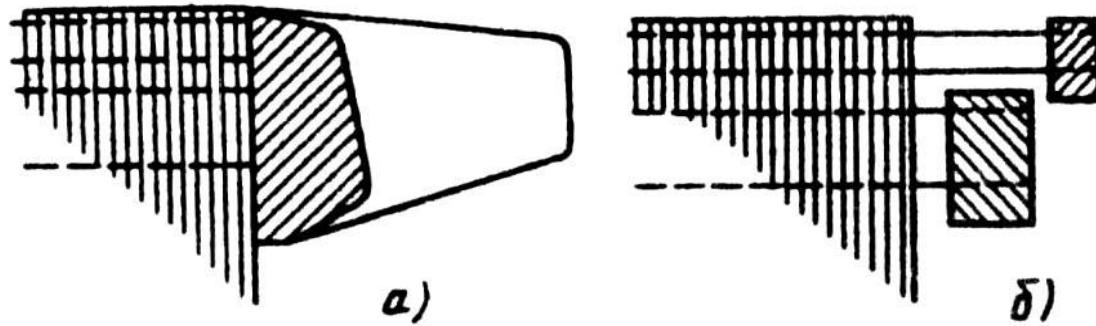


Рис. 9.39. Замыкающие кольца двухклеточных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей:
а — общие; б — раздельные

Увеличение теплоемкости пусковой клетки особенно важно для машин с длительными тяжелыми пусками, за время которых потери в роторе могут нагреть пусковую обмотку до недопустимо высокой температуры.

В современных машинах распространено также двухклеточное исполнение роторов с литыми обмотками (см. рис. 9.38, л). В таких конструкциях и пусковую, и рабочую клетки заливают одним металлом. Замыкающие кольца — общие, прилегающие к торцам ротора (рис. 9.39).

Выбирая ту или иную конструкцию клетки, форму и размерные соотношения стержней, следует исходить из требований к пусковым характеристикам двигателей и возможности размещения паза на зубцовом делении ротора, при котором обеспечивается нормальный уровень индукции в зубцах и ярме. Кроме того, необходимо учитывать влияние размерных соотношений пазов на индуктивное сопротивление обмотки ротора. При любой конфигурации паза уменьшение ширины верхней части стержней и увеличение их высоты приводят к увеличению пускового момента, но одновременно увеличивается коэффициент магнитной проводимости паза и растет индуктивное сопротивление обмотки ротора. Это в некоторых случаях может играть положительную роль — как фактор, ограничивающий пусковые токи, но в то же время увеличение индуктивного сопротивления ротора приводит к ухудшению коэффициента мощности при номинальном режиме работы и к снижению M_{max} .

То же характерно для двигателей с двухклеточными роторами, имеющими большие пусковые моменты, но низкие коэффициенты мощности при номинальном режиме, так как поток пазового рассеяния в перемычке между стержнями рабочей и пусковой клеток достигает больших значений. Поэтому для обеспечения высоких энергетических показателей номинального режима следует, прежде всего, ориентироваться на пазы ротора с широкой

верхней частью — грушевидные (см. рис. 9.38, а). Пазы других форм (прямоугольные, фигурные) или двойную клетку применяют только в том случае, когда пусковые характеристики двигателя с ротором, имеющим грушевидные пазы, не удовлетворяют

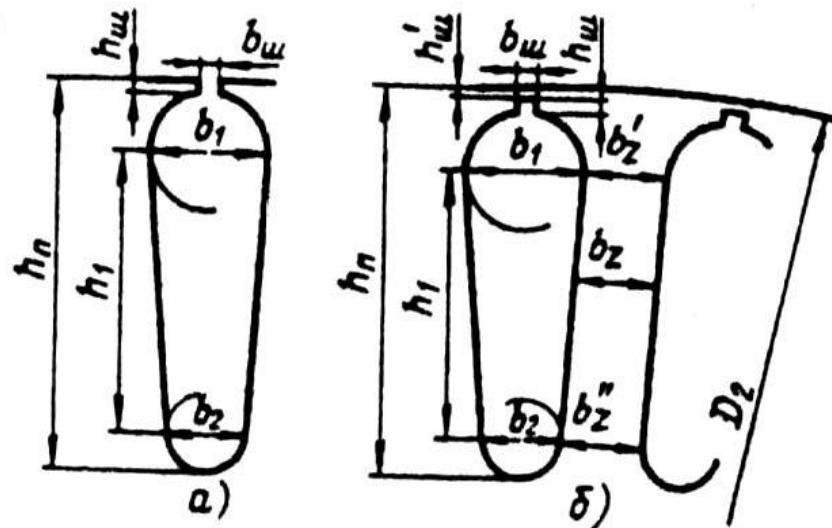


Рис. 9.40. Трапецидальные пазы короткозамкнутого ротора:
а — полузакрытые; б — закрытые

требованиям, поставленным в техническом задании.

В большинстве асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм выполняют трапецидальные пазы и литую обмотку на роторе (рис. 9.40). Размерные соотношения пазов b_1 , b_2 и h_1 обеспечивают параллельность боковых граней зубцов. В двигателях с $h < 160$ мм пазы имеют узкую прорезь со следующими размерами: $b_w = 1,0$ мм и $h_w = 0,5$ мм при высоте оси вращения $h < 100$ мм; $b_w = 1,5$ мм и $h_w = 0,75$ мм при высоте вращения $A = 112\ldots132$ мм. В двигателях с $h = 160\ldots250$ мм выполняют трапецидальные закрытые пазы (рис. 9.40, б) с размерами шлица $b_w = 1,5$ мм и $h_w = 0,7$ мм. Высота перемычки над пазом в двигателях с $2p > 4$ выполняется равной $h'_w = 0,3$ мм, в двухполюсных двигателях $h'_w = 1,0\ldots1,5$ мм.

Размеры паза ротора рассчитывают исходя из требуемого сечения стержня q_c , полученного по (9.68), допустимой индукции в зубце и из условия постоянства ширины зубца, т. е. параллельности его граней.

По допустимой индукции (см. табл. 9.12) определяют ширину зубца ротора:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta t_{z2} l_\delta}{B_{z2} l_{ct2} k_c}. \quad (9.75)$$

После чего рассчитывают размеры паза (рис. 9.40):

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_w - 2h'_w) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2}; \quad (9.76)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2(Z_2/\pi D_2 + \pi/2) - 4q_c}{Z_2/\pi + \pi/2}}; \quad (9.77)$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi}. \quad (9.78)$$

После расчета размеры паза следует округлить до десятых долей миллиметра и уточнить площадь сечения стержня q_c :

$$q_c = \frac{q}{8}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)h_1. \quad (9.79)$$

Условия высококачественной заливки пазов алюминием требуют, чтобы диаметр закругления нижней части паза в двигателях с $h \leq 132$ мм был не менее 1,5...2 мм, в двигателях с $h \geq 160$ мм — не менее 2,5...3 мм.

В связи с округлениями результатов расчета необходимо просчитать ширину зубцов в сечениях b'_{z2} и b''_{z2} по окончательно принятым размерам паза:

$$b'_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}}) - b_1}{Z_2} - b_1; \quad (9.80)$$

$$b''_{z2} = \frac{D_2 - 2h_{\text{п}} + b_2}{Z_2} - b_2. \quad (9.81)$$

При небольшом расхождении размеров b'_{z2} и b''_{z2} в расчете магнитного напряжения зубцов ротора используется средняя ширина зубца $b_{z2} = (b'_{z2} + b''_{z2}) / 2$. При заметных расхождениях расчет проводят так же, как для трапецидальных зубцов ротора (см. ниже).

Расчетная высота зубца принимается равной:

$$h_{z2} = h_n - 0,1 b_2. \quad (9.82)$$

В двигателях с высотой оси вращения $h = 280...355$ мм выполняют закрытые пазы ротора: при $2p \geq 4$ — трапецидальные, сужающиеся в верхней части, и при $2p = 2$ — лопаточные (рис. 9.41).

Для расчета размеров трапецидальных сужающихся в верхней части пазов целесообразно использовать графоаналитический метод, аналогичный описанному в § 6.5 для пазов всыпной обмотки статора. Наименьшая допустимая ширина зубца $b_{z2\text{min}}$ находится по $B_{z2\text{max}}$ (см. табл. 9.12). На построенном в достаточно большом масштабе эскизе зубцового деления ротора, изменяя b_2 и $b_{\text{п}}$, графически определяют размеры паза по заданной площади сечения стержня q_c , при которых $B_{z2\text{max}}$ остается в допустимых пределах. Высота перемычки над пазом принимается равной $h'_{\text{ш}} = 0,5$ мм. Диаметр закругления верхней части паза должен быть не менее $b_1 \geq 3,5...4$ мм. После построения определяют ширину зубца ротора:

$$b_{z2\text{max}} = \pi \frac{D_2 - (2h'_{\text{ш}} + b_1)}{Z_2} - b_1; \quad (9.83)$$

$$b_{z2\text{min}} = \pi \frac{D_2 - (2h_{\text{п}} - b_{\text{п2}})}{Z_2} - b_2. \quad (9.84)$$

Расчетная высота зубца

$$h_{z2} = h_n - 0,1b_2. \quad (9.85)$$

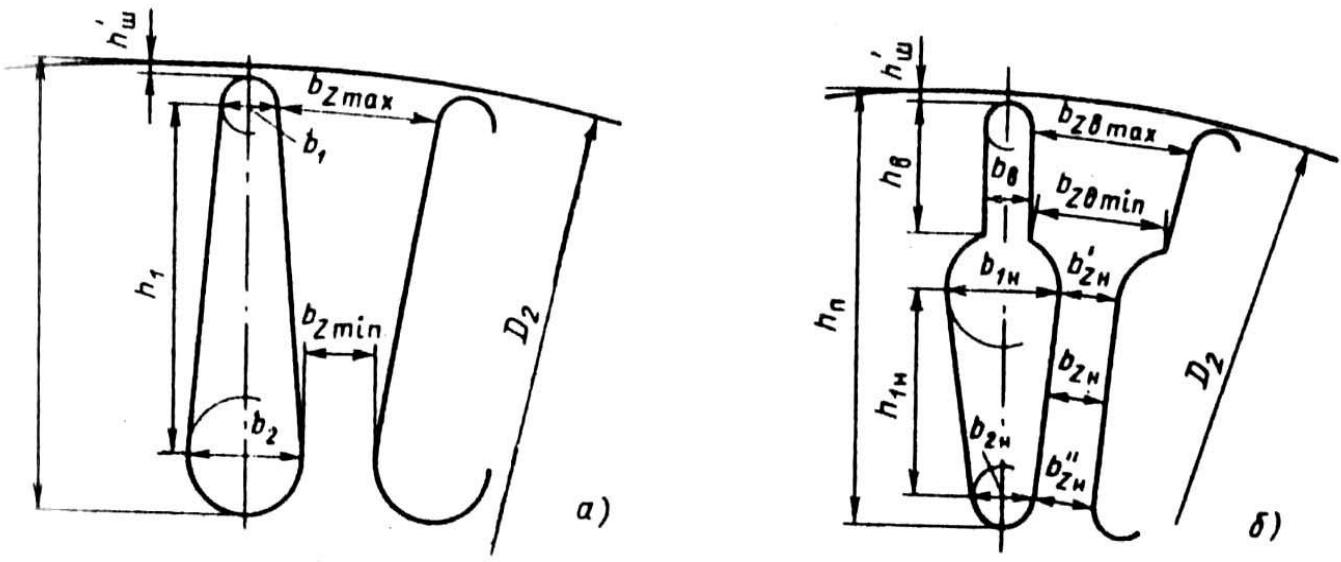


Рис. 9.41. Характерные размеры зубцовой зоны короткозамкнутого ротора:
а — с трапецидальными пазами; б — с лопаточными пазами

В лопаточных пазах (рис. 9.41, б) высоту верхней части паза h_B для получения наибольшего эффекта вытеснения тока во время пуска при литой алюминиевой обмотке выполняют равной 15...16 мм. Размеры нижней части лопаточных стержней рассчитывают, исходя из сечения стержня q_c и постоянства ширины зубцов ротора:

$$b_{1H} = \frac{\pi(D_2 - 2h'_w - 2h_B) - Z_2 b_{z2H}}{Z_2 + \pi} \quad (9.86)$$

где b_{z2H} — ширина зубца на нижнем участке, определяемая по допустимой индукции в зубцах ротора (см. табл. 9.12); h'_w — высота перемычки над пазом. Для двигателей с $2p = 2$ принимают $h'_w = 1...2$ мм.

Ширина верхней части стержня

$$b_B = (0,5...0,65) b_{1H}. \quad (9.87)$$

Требуемое сечение нижней части стержня

$$q_{c.H} = q_c - q_{c.v.} . \quad (9.88)$$

где сечение верхней части стержня

$$q_{c.v.} = b_B (h_B - 0,11 b_B). \quad (9.89)$$

Диаметр закругления нижней части стержня

$$b_{2H} = \sqrt{\frac{b_{1H}^2 \left[\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right] - 4q_{c.H}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad (9.90)$$

Наименьший допустимый размер $b_{2H} = 3\dots4$ мм.

Если по (9.90) $b_{2H} < 3$ мм, следует или уменьшить сечение стержня (увеличить плотность тока в нем), или несколько увеличить индукцию в зубцах ротора.

Расстояние между центрами закруглений нижней части стержня

$$h_{1H} = (b_{1H} - b_{2H}) \frac{Z_2}{2\pi} \quad (9.91)$$

После округления полученных размеров до десятых долей миллиметра уточняют площадь сечения стержня ротора: $q_{c.b.}$ по (9.89) и

$$q_{c.H} = \frac{\pi}{8} (b_{1H}^2 + b_{2H}^2) + (b_{1H} + b_{2H}) \frac{h_{1H}}{2}; \quad (9.92)$$

$$q_c = q_{c.b.} + q_{c.H} \quad (9.93)$$

Размеры зубцов в верхних и нижних частях рассчитывают раздельно.

Размеры верхней части зубца:

$$B_{Z_B \max} = \pi \frac{D_2 - (2h'_{III} + b_B)}{Z_2} - b_B; \quad (9.94)$$

$$b_{Z_B \min} = \pi \frac{D_2 - 2h_B}{Z_2} - b_B, \quad (9.95)$$

где $h'_B = h_B + h'_{\text{ш}}$.

Размеры нижней части зубца:

$$b'_{Z_H} = \pi \frac{D_2 - 2h'_B - b_{1H}}{Z_2} - b_{1H}; \quad (9.96)$$

$$b''_{Z_H} = \pi \frac{D_2 - (2h_{II} - b_{2H})}{Z_2} - b_{2H}; \quad (9.97)$$

Расчетная высота участков зубца:

верхнего

$$h_{Z_B} = h'_B; \quad (9.98)$$

нижнего

$$a_{Z_H} = h_H - 0,1b_{2H}. \quad (9.99)$$

В короткозамкнутых роторах с обмоткой из вставных алюминиевых шин выполняют открытые прямоугольные пазы (рис. 9.42). Размеры паза находят исходя из допустимой ширины зубца $b_{z2\min}$, определенной по допустимой $B_{z2\max}$ (см. табл. 9.12). Ширина паза

$$b_n = \frac{(t_{z2} - b_{z2\min}) \pm \sqrt{(t_{z2} - b_{z2\min})^2 - S_{n2} \frac{8\pi}{Z_2}}}{2} \quad (9.100)$$

где S_{n2} — полная площадь поперечного сечения паза, которую предварительно берут равной:

$$S_{n2} \approx 1,1 q_c.$$

Из двух возможных значений b_n , полученных по (9.100), следует выбрать значение, удовлетворяющее требованиям конструкции. Ширина алюминиевой шины должна быть меньше ширины паза в штампе на припуск на сборку сердечника Δb_n (см. табл. 9.14). Размеры паза окончательно определяют после выбора стандартного сечения и размеров алюминиевой шины (табл. П 3.7).

Высота паза

$$h_n = h_c + \Delta h_n + h_w, \quad (9.101)$$

где Δh_n определяют по табл. 9.14; h_w — высота шлица, в роторах такой конструкции выполняется равной 4 мм;

высота стержня

$$h_c = q_c / b_c.$$

Наибольшая и наименьшая ширины зубцов при прямоугольных пазах ротора определяются по (9.61) и (9.63). Расчетная высота зубца принимается равной высоте паза:

$$h_z = h_n.$$

9.8.3. Сердечники роторов

Сердечники роторов асинхронных двигателей при $D_2 < 990$ выполняют с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки. В двигателях с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм применяют посадку сердечников на гладкий вал без шпонки. В двигателях больших размеров сердечники крепят на валу с помощью шпонки. Ее диаметр ротора превышает 990 мм, то сердечник шихтуют из отдельных сегментов и крепят на втулке ротора или на продольных ребрах, приваренных к валу (оребренные валы) (см. гл. 8).

В большинстве двигателей с высотой оси вращения $h \geq 250$ выполняют аксиальные каналы в целях некоторого улучшения условий охлаждения ротора и снижения его массы и момента инерции.

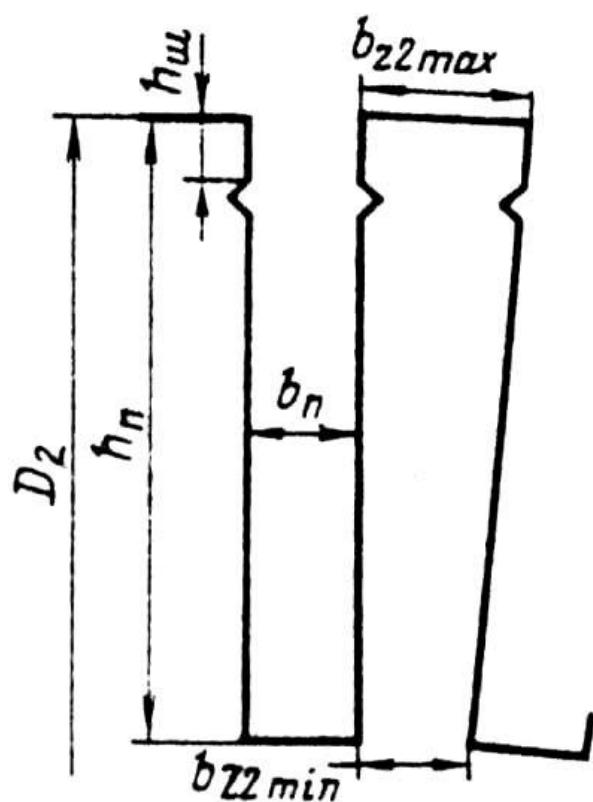


Рис. 9.42. Характерные размеры зубцовой зоны короткозамкнутого ротора с обмоткой из вставных прямоугольных алюминиевых шин

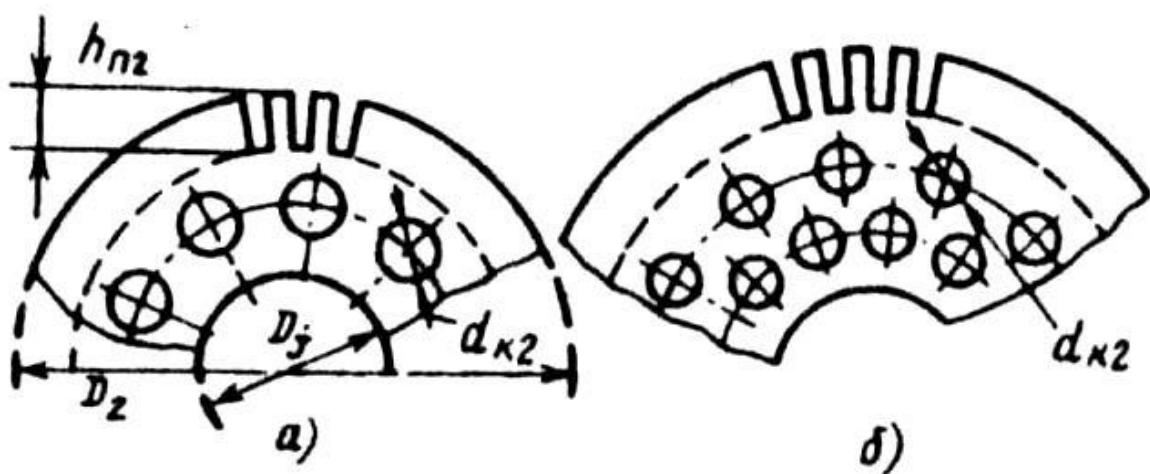


Рис. 9.43. Аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике ротора:
 а — расположение каналов в один ряд ($m_{k2} = 1$);
 б — расположение каналов в два ряда ($m_{k2} = 2$)

Аксиальные каналы (рис. 9.43) могут быть расположены в одном ряду ($m_{k2} = 1$) или при больших диаметрах ротора в двух рядах ($m_{k2} = 2$). Число аксиальных каналов в сердечнике ротора обычно колеблется от 9 до 12, а их диаметр (d_{k2}) — в пределах от 15 до 30 мм. Большие диаметры выполняют в роторах двигателей с большим числом полюсов. При расположении каналов в два ряда их диаметры уменьшают.

Радиальные каналы в сердечнике ротора, так же как и в статоре, выполняют лишь при длине сердечника, превышающей 0,25...0,3 м. В таких роторах необходимо предусматривать также и выполнение аксиальных каналов, которые служат для прохода охлаждающего воздуха к радиальным каналам.

Наличие каналов, их диаметр и расположение оказывают влияние, на магнитное напряжение ярма ротора и должны учитываться при расчете магнитной цепи.

Внутренний диаметр сердечника ротора D_j при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала D_B и может быть определен по формуле

$$D_B \approx k_B D_a. \quad (9.102)$$

Значения коэффициента k_B даны в табл. 9.19.

Таблица 9.19. Значения коэффициента

h , мм	50...63	71...250	280...355		400...500		
2р	2...6	2...8	2	4...12	4	6	8...12
k_B	0,19	0,23	0,22	0,23	0,2	0,23	0,25

Если сердечник ротора насажен на втулку или оребренный вал, то внутренний диаметр D_j , м, определяется исходя из допустимой индукции в ярме ротора (см. § 9.9) с использованием следующих выражений:

$$h_j = \Phi / (2B_j l_{cm2} k_c); \quad D_j = D_2 - 2(h_{n2} + h_j).$$

9.9. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи проводят для режима холостого хода двигателей, при котором для асинхронных машин характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора. Как отмечено в гл. 4, насыщение зубцовых зон приводит к уплощению кривой поля в воздушном зазоре (рис. 9.44). Пересечение реальной (уплощенной) кривой поля 2 в зазоре с основной гармонической 1 происходит в точках, отстоящих от оси симметрии одного полупериода кривой на угол 35° . Поэтому за расчетную индукцию принимается не амплитудное значение, а $B_{расч} = B_{max} \cos \psi \approx B_{max} \cos 35^\circ \approx 0,82 B_{max}$. По $B_{расч}$ следует

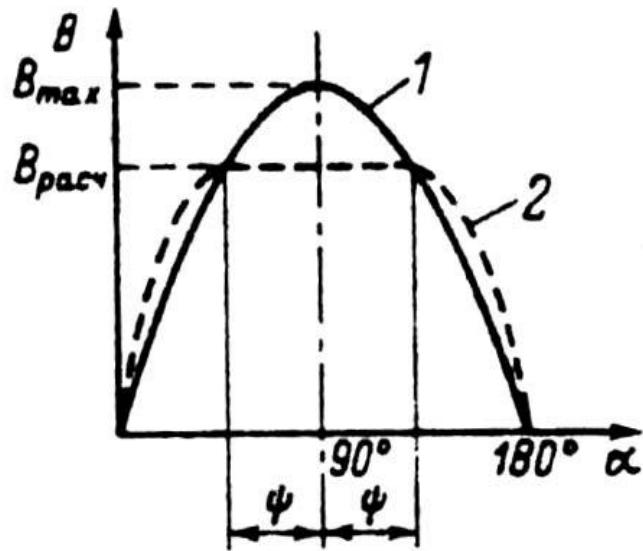


Рис. 9.44. Распределение индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя:

- 1 — ненасыщенного (синусоидальная кривая);
- 2 — насыщенного (уплощенная кривая)

определить $H_{\text{расч}}$ по основной кривой намагничивания и увеличить затем результат в $k = 1/0,82$ раз, приведя напряженность к амплитудному значению индукции. Для воздушного зазора, имеющего линейную зависимость $H = f(B)$, эта операция равносильна непосредственному определению магнитного напряжения зазора по B_δ . При определении магнитных напряжений участков магнитной цепи с нелинейными магнитными характеристиками влияние уплощения учитывается специальными кривыми намагничивания для зубцов и ярм асинхронных двигателей, построенными по основной кривой намагничивания с учетом указанных зависимостей. При этом принимают

$$a_\delta = 2/\pi \approx 0,637 \text{ и } k_e = \pi/(2\sqrt{2}) \approx 1,11.$$

Марку электротехнической стали рекомендуется выбирать в зависимости от высоты оси вращения проектируемого асинхронного двигателя:

Марка стали.....	2013	2212	2214	2312	2412
Высота оси вращения, мм.	45...250	160...250	71...250	280...355	280...560

Расчет магнитной цепи проводят в следующей последовательности.

9.9.7. Магнитное напряжение воздушного зазора

Расчет магнитного напряжения воздушного зазора, как и всех последующих участков магнитной цепи, рекомендуется проводить на два полюса машины, т.е. вдоль замкнутой силовой линии потока полюса. Возможен также расчет на один полюс, при этом полученные по расчетным формулам данного параграфа магнитные напряжения участков цепи F_i , необходимо уменьшить в 2 раза, а при определении намагничивающего тока (см. ниже) суммарное

магнитное напряжение всей цепи соответственно увеличить в 2 раза. Окончательный результат от этого не меняется.

Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta, \quad (9.103)$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл, рассчитанная по (9.23) по окончательно принятому числу витков в фазе обмотки w_l и обмоточному коэффициенту k_{ob} определенному для принятой в машине обмотки; δ — воздушный зазор, м; k_δ — коэффициент воздушного зазора, рассчитанный по (4.15) или (4.16); μ_0 — магнитная проницаемость: $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

9.9.2. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора

Общая формула для расчета магнитного напряжения зубцовой зоны статора

$$F_{Zl} = 2h_{z1} H_{z1}, \quad (9.104)$$

где h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м; H_{z1} — расчетная напряженность поля в зубце, А. Напряженность поля в зубце определяют по кривым намагничивания для зубцов принятой при проектировании марки стали (см. Приложения 1 и 2).

Расчетную высоту зубцов h_{z1} и расчетную напряженность поля H_{z1} определяют по-разному в зависимости от конфигурации зубцов, связанной с формой пазов статора.

Зубцы с параллельными гранями (в статорах с грушевидными или трапецидальными пазами по рис. 9.29). Индукция в зубце

$$B_{Zl} = \frac{B_\delta b_{z1} l_\delta}{B_{z1} l_{ct1} k_{c1}}, \quad (9.105)$$

где b_{z1} — расчетная ширина зубца, м, определяется по формулам табл. 9.15; если размеры b'_{z1} и b''_{z1} одинаковы, то $b_{z1} = b'_{z1} = b''_{z1}$; если размеры b'_{z1} и b''_{z1} различаются менее чем на 0,5 мм, то $b_{z1} = 0,5(b'_{z1} + b''_{z1})$. При различии, превышающем 0,5 мм, следует либо скорректировать размеры паза, либо определить расчетную напряженность поля H_{z1} как для зубцов с изменяющейся площадью поперечного сечения (см. ниже); k_{c1} — коэффициент заполнения сталью сердечника статора (см. табл. 9.13).

Расчетная напряженность поля, А/м, $H_{z1} = f(B_{z1})$.

Расчетная высота паза h_{z1} определяется по табл. 9.17.

Магнитное напряжение зубцовой зоны

$$F_{Zl} = 2h_{z1} H_{z1}. \quad (9.105a)$$

Зубцы с изменяющейся площадью поперечного сечения (в статорах с прямоугольными пазами по рис. 9.28). Расчетная высота зубца $h_{z1} = h_\Pi$. Расчетная напряженность поля

$$H_{z1} = (H_{Zlmax} + 4H_{Zlcp} + H_{Zlmin}) / 6, \quad (9.106)$$

где H_{Zlmax} , H_{Zlmin} и H_{Zlcp} — напряженности поля в наименьшем, наибольшем и среднем сечениях зубца, определяемые по индукциям в этих сечениях: B_{Zlmax} , B_{Zlmin} и $B_{Zlcp} = 0,5(B_{Zlmax} + B_{Zlmin})$.

Индукции $B_{z1\max}$ и $B_{z1\min}$ рассчитывают по (9.105), подставляя в формулу вместо размера b_{z1} соответственно наименьшее и наибольшее значения ширины зубца, м, рассчитанные по формулам табл. 9.15.

Магнитное напряжение зубцовой зоны, А,

$$F_{z1} = 2h_{z1} H_{z1}. \quad (9.107)$$

Практикуют также определение расчетной напряженности по индукции в поперечном сечении зубца на расстоянии $1/3$ высоты от его наиболее узкой части. В этом случае в (9.105) вместо b_{z1} подставляют значение $b_{z1/3}$ (см. табл. 9.15). Расчетная напряженность поля в зубце $H_{z1} = H_{z1/3} = f B_{z1/3}$.

Если индукция в каком-либо одном или в нескольких сечениях зубца окажется больше 1,8 Тл, то необходимо учесть ответвление части потока зубцового деления $\Phi_{tz} = B_\delta t_{z1} l_\delta$ в паз, при котором действительная индукция в зубце уменьшается по сравнению с рассчитанной по (9.105). Метод определения действительной индукции изложен в гл. 4. При его использовании коэффициенты k_P рассчитывают для каждого из сечений зубца, в котором индукция превышает 1,8 Тл, и соответствующего ему по высоте сечения паза. По значению k_P и расчетной индукции определяют действительную индукцию в данном сечении зубца.

В зубцах с параллельными гранями при индукции выше 1,8 Тл коэффициент k_P рассчитывают по соотношению площадей поперечных сечений зубца и паза на середине высоты зубца. В зубцах с изменяющейся площадью поперечного сечения при определении расчетной напряженности по $B_{z1/3}$ коэффициент k_P рассчитывают по соотношению площадей поперечных сечений зубца и паза на высоте $1/3$ наиболее узкой части зубца. Это приводит к некоторой погрешности в определении расчетной напряженности поля в зубце, но при средних уровнях индукций, характерных для зубцовой зоны статора, эта погрешность не оказывает заметного влияния на результаты расчета.

9.9.3. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора

Расчет магнитного сопротивления зубцовой зоны ротора зависит от формы пазов и типа ротора: фазный ротор или короткозамкнутый с одной обмоткой (беличьей клеткой) или короткозамкнутый ротор с двумя обмотками — рабочей и пусковой (ротор с двойной беличьей клеткой). К последнему типу относят также одноклеточные короткозамкнутые роторы с одной беличьей клеткой, имеющие фигурные пазы — лопаточные или колбообразные, которые при расчете рассматривают как роторы с двойной беличьей клеткой.

Магнитное напряжение зубцовой зоны фазного и короткозамкнутого роторов с одной беличьей клеткой с прямоугольными или с трапецидальными пазами (по рис. 9.32, а, б; 9.40 и 9.41, а). Общая формула расчета магнитного напряжения

$$F_{z2} = 2h_{z2} H_{z2}. \quad (9.108)$$

где h_{z2} — расчетная высота зубца (по табл. 9.20), м; H_{z2} — расчетная напряженность поля в зубце ротора, А/м.

Таблица 9.20. Размеры зубцов фазных и короткозамкнутых одноклеточных роторов с прямоугольными и трапецидальными пазами

Размер	Форма пазов ротора по рис. 9.40			
	9.32, а; 9.42	9.32, б	9.40, а, б	9.41, а

$b_{Z\max}$	$\frac{\pi D_2}{Z_2} - b_\Pi$	$\frac{\pi D_2 - 2(h_{III} - h_K)}{Z_2} - b_\Pi$	—	$\frac{\pi D_2 - (2h'_{III} + b_1)}{Z_2} - b_1$
$b_{Z\min}$	$\frac{\pi D_2 - 2h_\Pi}{Z_2} - b_\Pi$	—	—	$\frac{\pi D_2 - 2(h_\Pi - b_2)}{Z_2} - b_2$
$b_{Z1/3}$	$\frac{\pi D_2 - \frac{4}{3}h_\Pi}{Z_2} - b_\Pi$	—	—	$b_{Z\min} + \frac{b_{Z\max} + 2b_{Z\min}}{3}$
h_z	—	—	$h_\Pi = 0,1 b_2$	$h_\Pi = 0,1 b_2$
b'_z	—	—	$\frac{\pi D_2 - 2(h_{III} - h'_m)}{Z_2} - b_1$	—
b''_z	—	—	$\frac{\pi D_2 - 2(h_\Pi - h_2)}{Z_2} - b_2$	—

Расчетная напряженность поля H_{z2} в зубцах с параллельными гранями (см. рис. 9.40, а, б), Тл, определяется в зависимости от индукции в зубце

$$B_{z2} = \frac{B_\delta B_{z2} l_\delta}{B_{z2} l_{ct2} k_{c2}}, \quad (9.109)$$

где k_{c2} — коэффициент заполнения сердечника ротора сталью (см. табл. 9.13); b_{z2} — ширина зубца ротора, м, определяется по формулам табл. 9.20.

Если расчеты b'_{z2} и b''_{z2} (табл. 9.20) дают одинаковые результаты, то $b_{z2} = b'_{z2} = b''_{z2}$. Если полученные размеры b'_{z2} и b''_{z2} различаются менее чем на 0,5 мм, то $b_{z2} = 0,5 (b'_{z2} + b''_{z2})$.

При различии, превышающем 0,5 мм, следует либо скорректировать размеры паза с целью уменьшить это различие, либо определить расчетную напряженность поля как для зубцов ротора с изменяющейся площадью поперечного сечения (см. ниже).

Расчетная напряженность поля в зубце

$$H_{z2} = f(B_{z2}).$$

Расчетная напряженность поля в зубцах ротора с изменяющейся площадью поперечного сечения (по рис. 9.32; 9.41, а; 9.42). Расчетная напряженность поля определяется как средняя

$$H_{z2} = (H_{Z2\max} + 4 H_{Z2cp} + H_{Z2\min}) / 6, \quad (9.110)$$

где $H_{Z2\max}$, $H_{Z2\min}$, и H_{Z2cp} — напряженности поля в наибольшем, наименьшем и среднем сечениях зубца, определяемые по индукциям в этих сечениях зубцов $B_{Z2\max}$, $B_{Z2\min}$, и $B_{Z2cp} = 0,5 (B_{Z2\max} + B_{Z2\min})$.

Индукции $B_{z2\max}$ и $B_{z2\min}$ рассчитывают по (9.109), подставляя в эту формулу вместо размера b_{z2} соответственно наименьшее ($b_{z2\min}$) и наибольшее ($B_{z2\max}$) значения ширины зубца, полученные по формулам табл. 9.20.

При расчете магнитного напряжения по напряженности поля в сечении на 1/3 высоты зубца ротора находят индукцию $B_{Z1/3}$, подставляя в формулу (9.109) вместо b_{z2} ширину зубца $b_{z1/3}$ (табл. 9.20). В этом случае расчетная напряженность

$$H_{z2} = H_{z1/3} = f(B_{z1/3}).$$

Если при расчете магнитного напряжения зубцов с переменным сечением $H_{Z2\max} > 2 H_{Z2\min}$, то более точные результаты дает деление зубца по высоте на две равные части и определение средних напряженностей в каждой из них в отдельности. В этом случае расчетная ширина зубца принимается на высоте $1/3$ каждой части, т. е. на высоте, приблизительно равной $0,2$ и $0,7$ всей высоты паза от его наиболее узкой части:

$$\left. \begin{aligned} b_{z0,2} &= b_{z2\min} + 0,2(b_{z2\max} - b_{z2\min}); \\ b_{z0,7} &= b_{z2\min} + 0,7(b_{z2\max} - b_{z2\min}). \end{aligned} \right\} \quad (9.111)$$

Определив индукцию $B_{z0,2}$ и $B_{z0,7}$ в этих сечениях зубца, находят соответствующие им напряженности поля $H_{z0,2}$ и $H_{z0,7}$. Магнитное напряжение зубцовой зоны, А, в этом случае

$$F_{z2} = h_{z2} (H_{z0,2} + H_{z0,7}), \quad (9.112)$$

Необходимо отметить, что для всех сечений зубцов, расчетная индукция в которых превышает $1,8$ Тл, необходимо определить действительную индукцию, т. е. учесть уменьшение потока в зубце за счет ответвления части потока зубцового деления в паз, как это указано в расчете зубцового напряжения зубцовой зоны статора.

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора с фигурными пазами и с двойной беличьей клеткой. При фигурных пазах ротора или двойной беличьей клетке рассчитывают раздельно магнитные напряжения верхней и нижней частей зубцов, А:

$$\left. \begin{aligned} F_{z2B} &= h_{z2B} H_{z2B}; \\ F_{z2H} &= h_{z2H} H_{z2H}, \end{aligned} \right\} \quad (9.113)$$

где h_{z2B} и h_{z2H} — расчетные высоты верхней и нижней частей зубца, м, определяемые по формулам табл. 9.21 и 9.20; H_{z2B} и H_{z2H} — расчетные напряженности верхней и нижней частей зубца, А/м.

Расчет индукции для определения расчетных напряженностей H_{z2B} и H_{z2H} проводят по формулам, аналогичным приведенным выше для одноклеточных роторов, формулы для определения ширины зубцов в различных сечениях приведены в табл. 9.21 и 9.22 в зависимости от конфигурации пазов (рис. 9.45 и 9.46).

Магнитное напряжение зубцовой зоны роторов с фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, А/м,

$$F_{z2} = 2 (F_{z2B} + F_{z2H}). \quad (9.114)$$

Учет ответвления потока в паз при индукциях выше $1,8$ Тл при расчете магнитного напряжения так же обязателен, как и при расчете зубцовых зон с другими конфигурациями пазов.

После расчета магнитных напряжений F_δ , F_{z1} и F_{z2} определяют коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} \quad (9.115)$$

Полученное значение k_z позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины. Если $k_z > 1,5 \dots 1,6$, имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если $k_z < 1,2$, то зубцовую зону мало

Таблица 9.21. Размеры зубцов роторов асинхронных двигателей с фигурными пазами

Размер	Форма пазов ротора по рис. 9.40			
	9.45, а	9.45, б	9.45, в	9.45, г
$b_{Z_{\max}}$	$\pi \frac{D_2 - 2h_{III}}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - 2(h_{III} - h_B)}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - 2(h_{III} - h_B)}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - 2(h_{III} - \frac{d}{3})}{Z_2} - 0,94d$
$b_{Z_{\min}}$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_B$	—
h_{ZB}	h'_B	h'_B	h'_B	$0,9 + h_{III}$
$b_{Z_H \max}$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_H$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_H =$	$\pi \frac{D_2 - 2(h_B + \frac{1}{3}b_H)}{Z_2} - 0,94b_H$	—
$b_{Z_H \min}$	$\pi \frac{D_2 - 2h_{II}}{Z_2} - b_H$	$= \pi \frac{D_2 - (2h_{II} - b_H)}{Z_2} - b_H$	—	—
h_{Z_H}	h_H	$h_H - 0,1 b_H$	$0,9 b_H$	—

Таблица 9.22. Размеры зубцов двойной клетки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей

Размер	Форма пазов ротора по рис. 9.45		
	9.46, а	9.45, б	9.45, в
$b_{Z_{B,CP}}$	$\frac{D_2 - 2(h_{III} + \frac{1}{3}b_B)}{Z_2} - 0,94b_B$	—	—
h_{ZB}	—	$0,9 b_B + h_{III}$	—
$b_{Z_H \max}$	—	$\pi \frac{D_2 - 2(h'_B + h_0)}{Z_2} - b_H$	—
$b_{Z_H \min}$	—	$\pi \frac{D_2 - 2h_{II}}{Z_2} - b_H$	—
$b_{Z_H CP}$	$\pi \frac{D_2 - 2(h'_B + h_0 + 1,3b_H)}{Z_2} - 0,94b_H$	$\frac{b_{Z_H \max} + b_{Z_H \min}}{2}$	$\pi \frac{D_2 - (2h_{II} + b_{H2})}{Z_2} - b_{H2}$
h_{Z_H}	$0,9 b_H$	$h'_H - h_0$	$h'_H - h_0 - 0,1 b_{H2}$

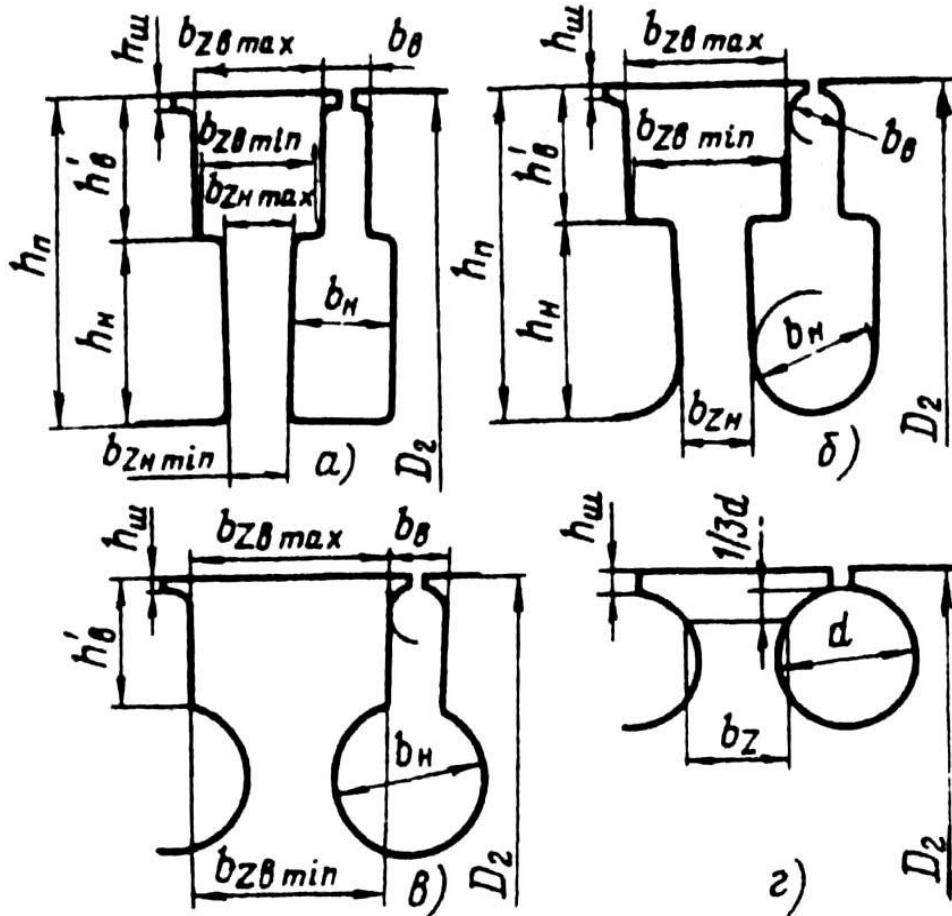


Рис. 9.45. Обозначение размеров зубцовой зоны короткозамкнутых роторов с фигурными пазами: а — г — различные формы пазов ротора

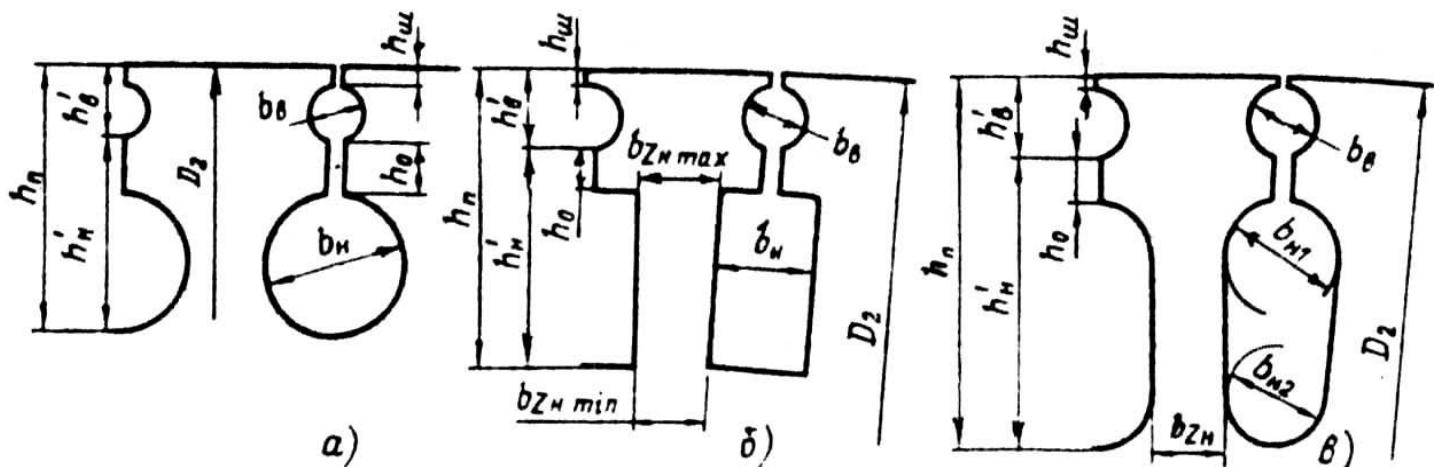


Рис. 9.46. Обозначения размеров зубцовой зоны короткозамкнутых роторов с двойной беличьей клеткой:
а — в — различные конфигурации пазов двухклеточных роторов

использована или воздушный зазор взят слишком большим. В обоих случаях в расчет должны быть внесены соответствующие корректизы.

При дальнейшем расчете магнитной цепи определяют магнитные напряжения ярм статора и ротора.

9.9.4. Магнитное напряжение ярма статора и ротора. Намагничивающий ток

Магнитное напряжение ярма статора, А,

$$F_a = L_a H_a, \quad (9.116)$$

где L_a — длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м; H_a — напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма, принятой при проектировании стали, А/м.

Индукция в ярме статора, Тл,

$$B_a = \Phi / (2h'_a l_{cm1} k_{c1}), \quad (9.117)$$

где h'_a — расчетная высота ярма статора, м:

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} - \frac{2}{3} d_{k1} m_{k1} \quad (9.118)$$

где d_{k1} и m_{k1} — диаметр и число рядов аксиальных вентиляционных каналов в сердечнике статора; при отсутствии каналов $m_{k1} = 0$.

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м,

$$L_a = (D_a - h_a) / (2p), \quad (9.119)$$

где h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = (D_a - D) / 2 - h_{n1}. \quad (9.120)$$

Магнитное напряжение ярма ротора, А,

$$F_j = L_j H_j \quad (9.121)$$

где H_j — напряженность поля в ярме при индукции B_j по кривой намагничивания для ярма принятой при проектировании стали. Индукция в ярме ротора, Тл,

$$B_j = \Phi / (2 h'_j l_{ct2} k_{c2}), \quad (9.122)$$

где k_{c2} — коэффициент заполнения сталью ярма ротора (по табл. 9.13); h'_j — расчетная высота ярма ротора, м.

Для роторов с посадкой сердечника на втулку или на оребренный вал (крупные асинхронные двигатели) расчетная высота ярма статора (см. рис. 9.43), м,

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} - \frac{2}{3} d_{k2} m_{k2}, \quad (9.123)$$

В двигателях с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал внутренний диаметр ротора равен диаметру вала: $D_j = D_B$. В таких двигателях с $2p = 2$ или 4 учитывают, что часть

магнитных силовых линий потока замыкается через вал. Поэтому в двигателях с $2p = 2$ расчетную высоту ярма ротора, м, определяют из выражения

$$h_j' = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_{k2} m_{k2}, \quad (9.124)$$

и длина силовых линий в ярме, м,

$$L_j = 2 h_j, \quad (9.125)$$

где высота ярма ротора, м,

$$h_j = (D_2 - D_e) / 2 - h_{n2}. \quad (9.126)$$

В двигателях с $2p = 4$ с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал, имеющих размерные соотношения, при которых $0,75(\frac{D_2}{2} - h_{n2}) < D_B$, расчетную высоту ярма ротора определяют по (9.124), при других размерных соотношениях — по (9.126).

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора всех двигателей, кроме двухполюсных, с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал, м,

$$L_j = \pi(D_j + h_j) / (2p), \quad (9.127)$$

где

$$h_j = (D_2 - D_j) / 2 - h_{na}.$$

На этом расчет магнитных напряжений участков магнитной цепи двигателя заканчивается. Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи (на пару полюсов), А,

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j. \quad (9.128)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_\mu = F_u / F_\delta. \quad (9.129)$$

Намагничающий ток, А,

$$I_\mu \approx \frac{p F_u}{0,9 m_1 w_1 k_{ob1}}. \quad (9.130)$$

Намагничающий ток выражается также в процентах или волях номинального тока двигателя:

$$I_\mu^* \approx I_\mu / I_{nom}. \quad (9.131)$$

Относительное значение I_μ^* служит определенным критерием правильности произведенного выбора и расчета размеров и обмотки двигателя. Так, если при проектировании

четырехполюсного двигателя средней мощности расчет показал, что $I_{\mu}^* < 0,20 \dots 0,18$, то в большинстве случаев это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и сопротивления, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большие массу и габариты.

Если же в аналогичном двигателе $I_{\mu}^* > 0,3 \dots 0,4$, то это в большинстве случаев означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и сопротивления.

В небольших двигателях мощностью менее 2...3 кВт I_{μ}^* может достигать значения 0,5...0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности [6].

9.10. ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора r_1 , x_1 , ротора r_2 , x_2 или приведенные к числу витков обмотки статора сопротивления ротора r'_2 и x'_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление r_{12} (или r_{μ}), введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

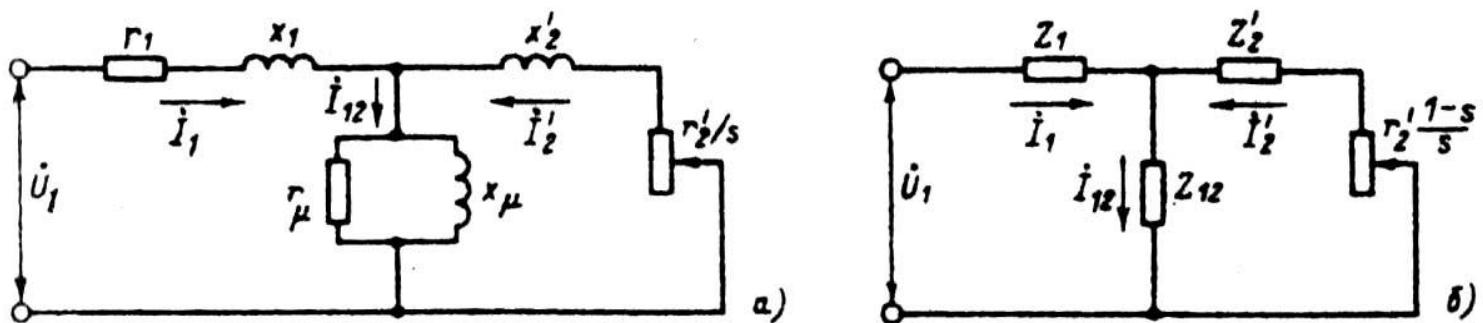


Рис. 9.47. Схемы замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины

Известные из общей теории электрических машин схемы замещения фазы асинхронной машины, основанные на приведении процессов во вращающейся машине к неподвижной, приведены на рис. 9.47. Физические процессы в асинхронной машине наглядно отражает схема, изложенная на рис. 9.47, а. Но для расчета оказалось удобнее преобразовать ее в схему, показанную на рис. 9.47, б.

Параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния, и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x_2 .

Увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r_2 и x_2 . При расчете рабочих режимов машины в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают.

При расчете пусковых режимов, в которых токи машины в несколько раз превышают номинальный, а частота тока в роторе близка к частоте питающей сети, в большинстве случаев приходится учитывать изменение параметров от насыщения участков магнитопровода кода полями рассеяния и от влияния эффекта вытеснения тока.

9.10.1. Активные сопротивления обмоток статора и фазного ротора

Активные сопротивления r и r_2 , Ом, определяют по основной расчетной формуле (5.1):

$$r = k_R \rho_v \frac{L}{q_{\phi} a}, \quad (9.132)$$

где L — общая длина эффективных проводников фазы обмотки, м; q_{ϕ} — площадь поперечного сечения эффективного проводника, м²:

$$q_{\phi} = q_{el} n_{el}; \quad (9.133)$$

q_{el} — площадь поперечного сечения элементарного проводника; n_{el} — число элементарных проводников в одном эффективном; a — число параллельных ветвей обмотки; ρ_v — удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, Ом·м; k_R — коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока.

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому в расчетах нормальных машин, как правило, принимают $k_R = 1$. Некоторое увеличение потерь, обусловленное действием эффекта вытеснения тока, относят к дополнительным потерям.

В обмотках фазных роторов k_R также принимают равным единице независимо от размеров и числа проводников в пазу, так как частота тока в них при номинальном и близких к нему режимах очень мала.

Общая длина проводников фазы обмотки L , м,

$$L = l_{cp} w, \quad (9.134)$$

где l_{cp} — средняя длина витка обмотки, м; w — число витков фазы. Среднюю длину витка l_{cp} находят как сумму прямолинейных пазовых и изогнутых лобовых частей катушки:

$$l_{cp} = 2 (l_n + l_l). \quad (9.135)$$

Длина пазовой части l_n равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_n = l_{I(2)}.$$

Лобовая часть катушки имеет сложную конфигурацию (рис. 9.48). Точные расчеты ее длины и длины вылета лобовой части требуют предварительного определения всех размеров катушки и сопряжены со значительными объемами расчетов, данные которых в дальнейшем электромагнитном расчете обычно не используются. Для машин малой и средней мощности и в большинстве случаев для крупных машин достаточно точные для практических расчетов результаты дают эмпирические формулы, учитывающие основные особенности конструктивных форм катушек.

Катушки всыпной обмотки статора. Длина лобовой части, м,

$$l_l = K_l b_{km} + 2B; \quad (9.136)$$

вылет лобовых частей обмотки, м,

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{л}} b_{\text{км}} + B. \quad (9.137)$$

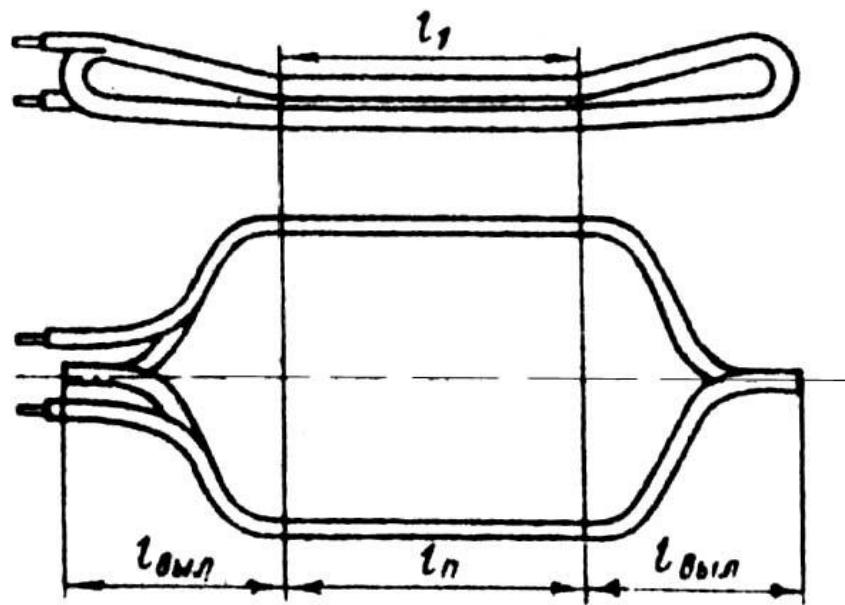


Рис. 9.48. Катушка двухслойной обмотки статора

В этих формулах $b_{\text{км}}$ — средняя ширина катушки, м, определяемая по окружности, проходящей по серединам высоты пазов:

$$b_{\text{км}} = \frac{\pi(D + h_{\text{п}})}{2p} \beta, \quad (9.138)$$

где $\beta = y_{\text{расч}} / \tau$ — укорочение шага обмотки статора. Для диаметральных двухслойных обмоток, выполненных без укорочения шага, и для двухслойных обмоток, включая обмотки из концентрических катушек, имеющих разную ширину, принимают $\beta = 1$; $K_{\text{л}}$ и $K_{\text{выл}}$ — коэффициенты, значения которых берут из табл. 9.23 в зависимости от числа полюсов машины и наличия изоляции в лобовых частях; B — длины вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, м.

Таблица 9.23. К расчету размеров лобовых частей катушек всыпной обмотки

Число полюсов 2p	Катушки статора			
	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	Кл	Квыл	Кл	Лвыл
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5
6	1,4	0,5	1,75	0,62
≥ 8	1,5	0,5	1,9	0,72

Для всыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, берут $B = 0,01$ м. В машинах, обмотки которых укладываются после запрессовки сердечника в корпус, вылет прямолинейной части $B = 0,015$ м.

Катушки из прямоугольного провода. В обмотках статоров и фазных роторов асинхронных двигателей, выполненных из прямоугольного провода, длина лобовой части витка, м,

$$l_{\lambda} = K_{\lambda} b_{km} + 2B + h_n; \quad (9.139)$$

вылет лобовой части обмотки (рис 9.49), м,

$$l_{выл} = K_{\lambda} b_{km} + B + 0,5 h_n, \quad (9.140)$$

где $b_{кт}$, — средняя ширина катушки, для катушек статора рассчитывается по (9.138), для катушек ротора

$$b_{km} = \frac{\pi(D_2 + h_{\Pi 2})}{2p} \beta, \quad (9.141)$$

β — укорочение шага обмотки ротора; B — вылет прямолинейной части катушек из паза (по табл. 9.24); K_{λ} , $K_{выл}$ — коэффициенты, определяемые из выражений

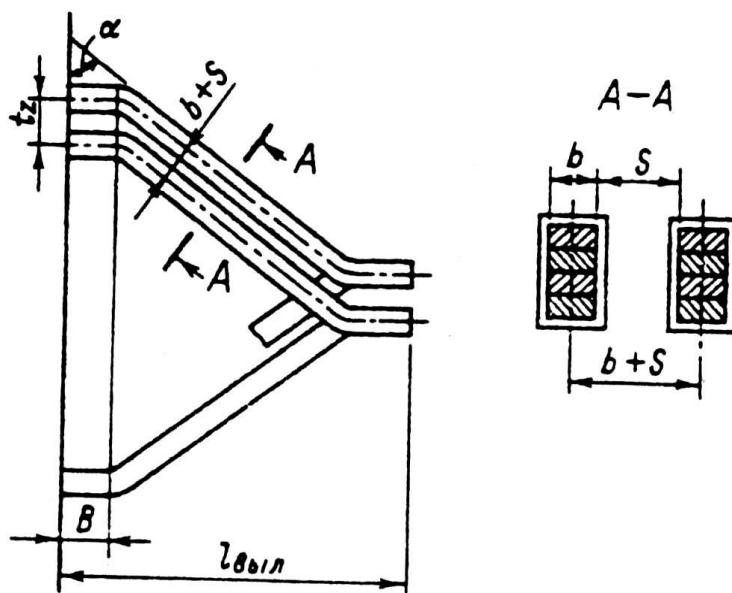


Рис. 9.49. Обозначения размеров катушек в лобовых частях

$$K_{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}; \quad (9.142)$$

$$K_{выл} = \frac{1}{2} K_{\lambda} m, \quad (9.143)$$

см. рис. 9.49.

Таблица 9.24. К расчету размеров лобовых частей катушек обмотки из прямоугольного провода

Напряжение U,B	S, 10 ⁻³ , м	B, 10 ⁻³ , м	Напряжение U, В	S, 10 ⁻³ , м	B, 10 ⁻³ , м

≤ 660	3,5	25	6000...6600	6...7	35...50
3000...3300	5...6	35...40	10000	7...8	60...65

Примечание. Меньшие значения для катушек с непрерывной изоляцией.

$$m = \sin \alpha = (b + S) / t_z; \quad (9.144)$$

b — ширина меди катушки в лобовой части, м; S — допустимое расстояние между медью проводников соседних катушек (по табл. 9.24), м; t_z — зубцовое деление, м.

Стержневая волновая обмотка фазных роторов асинхронных двигателей. Длина лобовых частей стержня ротора, м,

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} b_{\text{км}} + 2B_c; \quad (9.145)$$

вылет лобовой части, м,

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{\text{км}} + B_c, \quad (9.146)$$

где $b_{\text{км}}$ — среднее расстояние между сторонами последовательно соединенных стержней:

$$b_{\text{км}} = (D_2 - h_{n2}) / 2p; \quad (9.147)$$

B_c — сумма прямолинейных участков лобовой части стержня: длины вылета из паза и длины конца стержня в месте установки хомутиков, соединяющих стержни друг с другом. Обычно принимают 0,05...0,10 м (большие значения для машин большей мощности и напряжения). Для высоковольтных двигателей мощностью 800 - 1000 кВт и более берут $B_c = 0,12...0,16$ м.

Коэффициенты $K_{\text{л}}$ и $K_{\text{выл}}$ находят соответственно по формулам (9.142) и (9.143), в которых

$$m = (b_{\text{см}} + S_{\text{см}}) / t'_{z2}, \quad (9.148)$$

где $S_{\text{ст}}$ — расстояние между медью соседних стержней в лобовых частях, м ($S_{\text{ст}}$ принимают в соответствии с табл. 9.25 в зависимости от напряжения на контактных кольцах ротора при неподвижной машине); $b_{\text{ст}}$ — ширина меди стержня ротора, м; t'_{z2} — зубцовое деление по дну пазов ротора, м:

$$t'_{z2} = \pi(D_2 - 2h_{n2}) / Z_2 \quad (9.149)$$

Таблица 9.25. К расчету размеров лобовой части стержней фазных роторов асинхронных двигателей

$U_{\text{к.к.}}, \text{ В}$	500	500...1000	1000...1500	1500...2000
$S_{\text{ст}}, 10^{-3} \text{ м}$	1,7	2	2,6	2,9

После расчета $l_{\text{п}}$ определяют среднюю длину витка по (9.135) и длину всех стержней фазы обмотки по (9.134).

Активное сопротивление фазы ротора r_2 определяют по (9.132). Для дальнейших расчетов r_2 должно быть приведено к числу витков первичной обмотки

$$r'_2 = v_{I2} r_2, \quad (9.150)$$

где коэффициент приведения сопротивлений обмотки фазного ротора

$$v_{I2} = \frac{m_1 (w_1 k_{OB1})^2}{m_2 (w_2 k_{OB2})^2} \quad (9.151)$$

9.10.2. Индуктивные сопротивления обмоток двигателей с фазными роторами

Индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора двигателей с фазными роторами рассчитывают по формуле

$$x = 1,58 \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_n + \lambda_l + \lambda_d), \quad (9.152)$$

здесь расчетная длина l'_δ при наличии радиальных вентиляционных каналов для обмотки статора

$$l'_\delta = l_1 - 0,5 n_k b_k \quad (9.153)$$

и для обмотки ротора

$$l'_\delta = l_2 - 0,5 n_k b_k \quad (9.154)$$

при отсутствии радиальных каналов в этих формулах $n_k = 0$.

Входящие в (9.152) коэффициенты магнитной проводимости λ_n , λ_l и λ_d обмоток определяют следующим образом.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 9.26, в зависимости от конфигурации паза и расположения в нем проводников обмотки (рис. 9.50). В этих формулах значения коэффициентов k_β и k'_β зависят от укорочения шага обмотки β , которое определяют по расчетному шагу обмотки (см. гл. 3) $\beta = y_{расч} / \tau$.

При $\beta = 1$

$$k_\beta = k'_\beta = 1 \quad (9.155)$$

При обмотке с укорочением $2/3 \leq \beta \leq 1$

$$k'_\beta = 0,25 (1 + 3\beta); \quad (9.156)$$

при укорочении $1/3 \leq \beta \leq 2/3$

$$k'_\beta = 0,25 (6\beta - 1). \quad (9.157)$$

Коэффициент

$$k_\beta = 0,25 (1 + 3 k'_\beta). \quad (9.158)$$

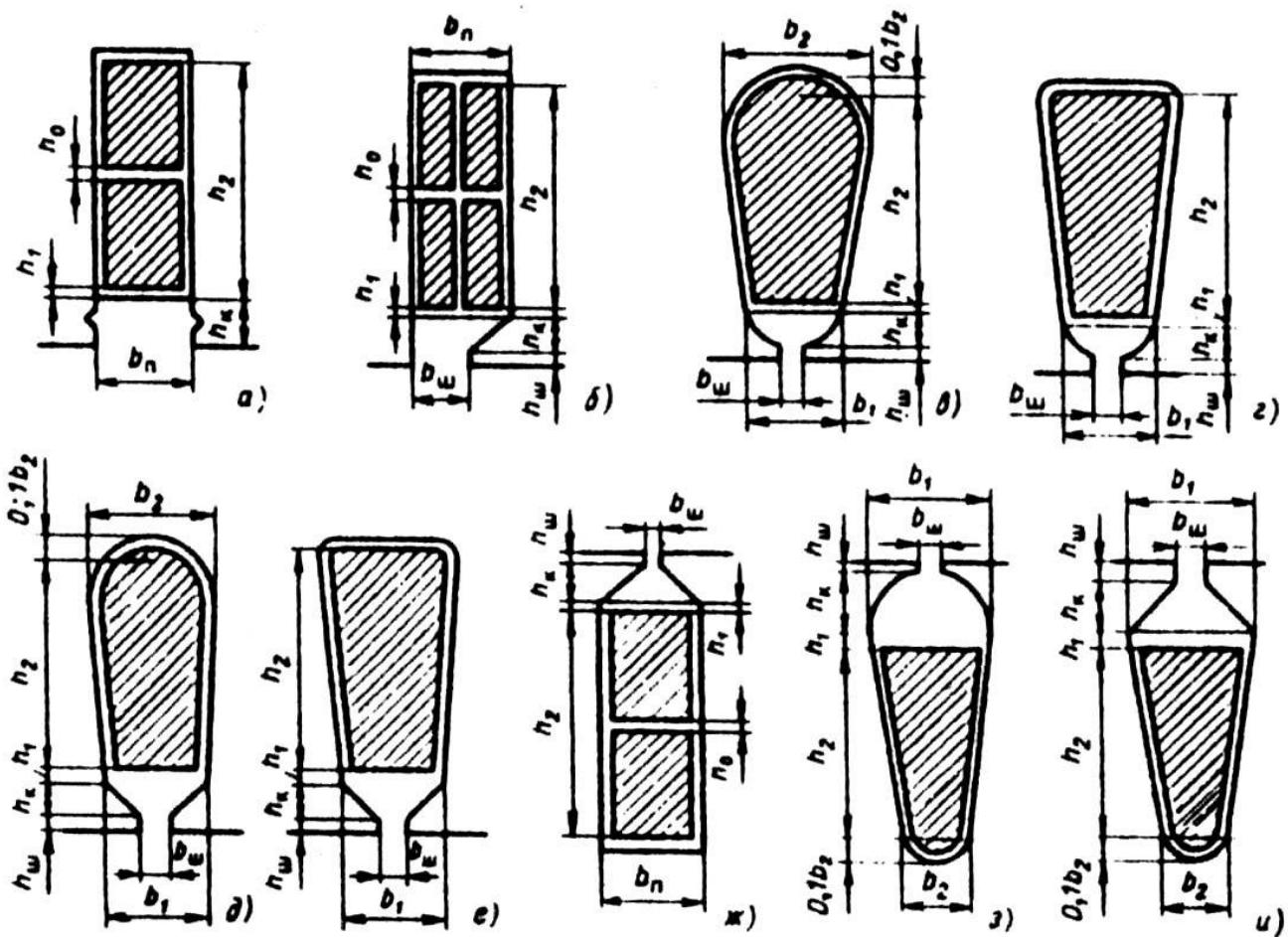


Рис. 9.50. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток:

а—е — обмотки статора; ж—и — обмотки фазного ротора

Таблица 9.26. Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния обмоток статора и фазного ротора асинхронных двигателей

Рисунок	Тип обмотки	Расчетные формулы
9.50, а	Двухслойная Однослойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_{II}} k_\beta + \frac{h_k}{b_{II}} k'_\beta + \frac{h_0}{4b_{II}}$ $\frac{h_2}{3b_{II}} + \frac{h_k}{b_{II}}$
9.50, б	Двухслойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_{II}} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_{II}} + \frac{3h_k}{b_{II} + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_\beta + \frac{h_0}{4b_{II}}$
9.50, в, г, з	Двухслойная и однослойная	$\frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_{III}}{2b_1} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_\beta$
9.50, д, е, и	То же	$\frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_\beta$
9.50, ж	Двухслойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_{II}} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_{II}} + \frac{3h_k}{b_{II} + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_\beta + \frac{h_0}{4b_{II}}$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\text{л}} = 0,34 \frac{q}{l_s} (l_{\text{л}} - 0,64 \beta \tau) \quad (9.159)$$

где q и $l_{\text{л}}$ — число пазов на полюс и фазу и длина лобовой части витка обмотки; $\beta = y_{\text{расч}} / \tau$ — укорочение шага обмотки, для которой проводится расчет, т. е. обмотки статора или фазного ротора.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния для обмоток статора и фазного ротора

$$\lambda_{\text{д}} = \frac{t_z}{12\delta k_s} \xi. \quad (9.160)$$

Значение коэффициента ξ зависит от числа q , укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора.

Ниже приводятся формулы, в которые при расчете ξ , для обмоток статора или ротора следует подставлять данные обмоток и зубцовых зон соответственно статора или ротора.

Для обмоток статора и ротора при q , выраженным целым числом ($q \geq 2$), для обмотки с $\beta = 1$

$$\xi = 2 + 0,022 q^2 - k_{o\delta}^2 (1 + \Delta z); \quad (9.161)$$

при укороченном шаге обмотки ($\beta < 1$)

$$\xi = k'' q^2 + k'_{\beta} - k_{o\delta}^2 (1 + \Delta z); \quad (9.162)$$

при дробном ($q \geq 2$)

$$\xi = k'' q^2 + 2k''_{\beta} - k_{o\delta}^2 \left(\frac{1}{d^2} + \Delta z \right); \quad (9.163)$$

при дробном q , значение которого $1 < q < 2$,

$$\xi = k'' q^2 + 2k''_{\beta} - \frac{k'}{q} - k_{o\delta}^2 \left(\frac{1}{d^2} + \Delta z \right); \quad (9.164)$$

В этих формулах коэффициенты Δz , k' , k'' и k''_{β} определяют по кривым, приведенным на рис. 9.51. Для определения k''_{β} и k' необходимо найти дробную часть числа q , равную c/d (дробное число $q = b + c/d$, где b — целое число, $c/d < 1$ — дробная часть числа q), коэффициент k'_{β} — по (9.156) или (9.157).

Индуктивное сопротивление обмотки фазного ротора, определенное по (9.152), должно быть приведено к числу витков обмотки статора:

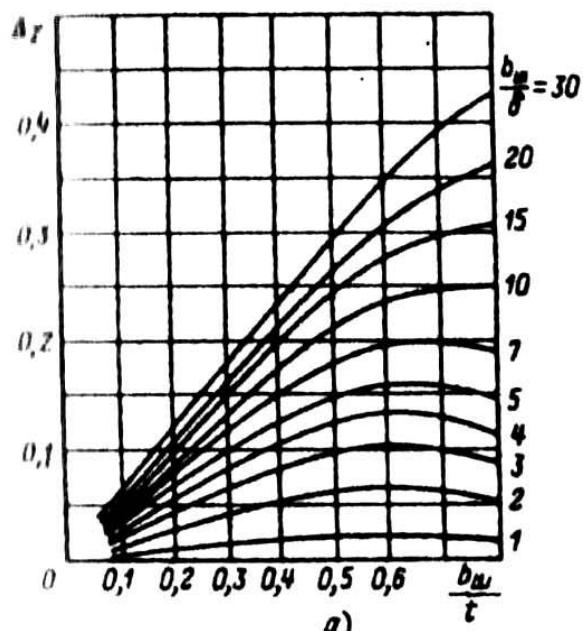
$$x'_2 = v_{12} x_2, \quad (9.165)$$

где v_{12} — коэффициент приведения сопротивлений по (9.151).

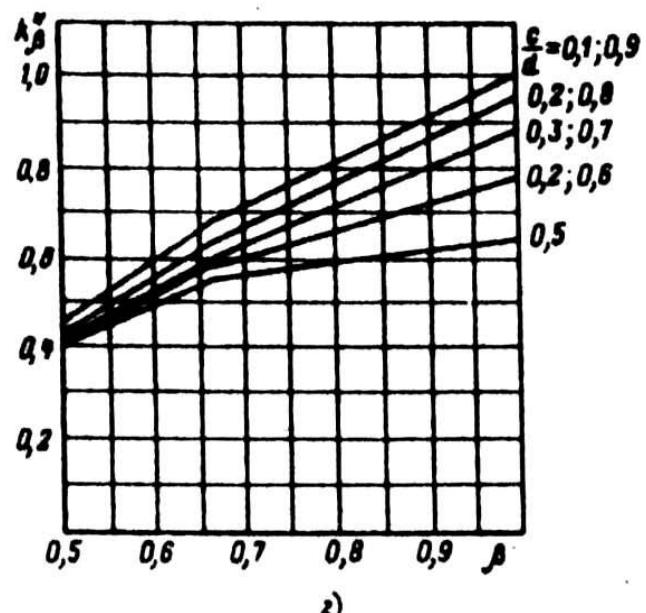
9.10.3. Сопротивления обмоток двигателей с короткозамкнутыми роторами

Активное сопротивление фазы обмотки статора двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается так же, как и для двигателя с фазным ротором.

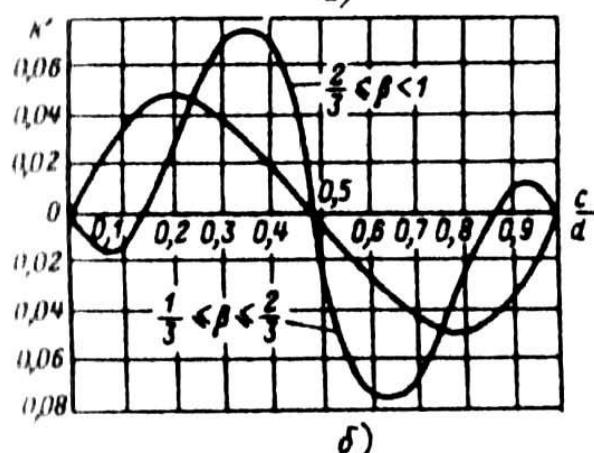
Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора определяется следующим образом. Как говорилось выше, за фазу обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, принимают один стержень и два участка замыкающих колец (см. рис. 9,35). Токи в стержнях и замыкающих кольцах различны, поэтому их сопротивления при расчете общего сопротивления фазы должны быть приведены к одному току. Таким образом, сопротивление фазы короткозамкнутого ротора r_2 является расчетным параметром, полученным из условия равенства электрических



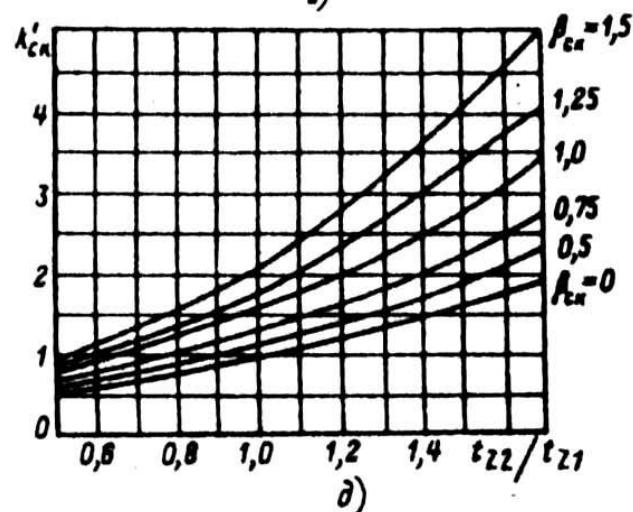
a)



z)



δ)



δ)

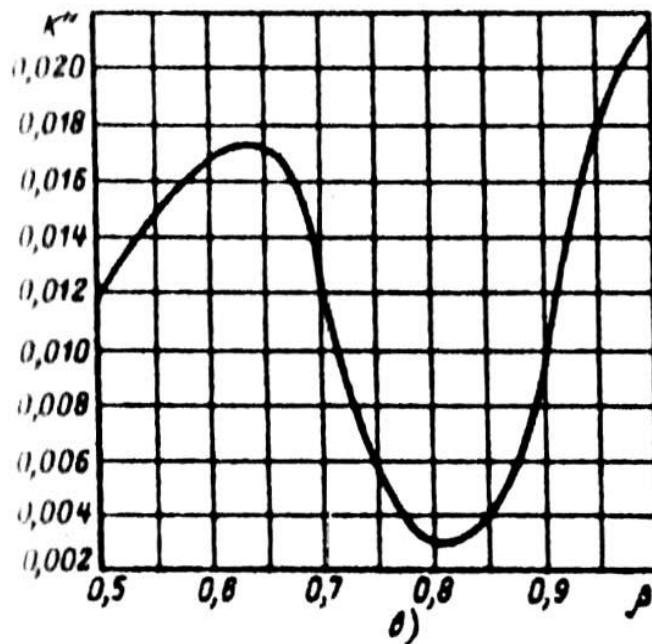


Рис. 9.51. Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния:

- а — коэффициент Δz в зависимости от размерных соотношений $b_{ш}/t_z$ и $b_{ш}/S$;
- б — коэффициент k' в зависимости от дробной части числа q ;
- в — коэффициент K' в зависимости от укорочения шага обмотки β ;
- г — коэффициент K''_β в зависимости от укорочения шага обмотки β и дробной части числа q ;
- д — коэффициент k'_{ck} в зависимости от соотношения t_{z2}/t_{z1} и относительного скоса пазов β_{ck}

потерь в сопротивлении r_2 от тока I_2 и суммарных потерь в стержне и участках замыкающих колец соответственно от тока в стержне I_c и тока в замыкающем кольце $I_{кл}$ реальной машины:

$$I_2^2 r^2 = I_c^2 r = 2 I_{кл}^2 r_{кл} \quad (9.166)$$

где I_c — ток в стержне ротора; $I_{кл}$ — ток в замыкающих кольцах; r_c — сопротивление стержня; $r_{кл}$ — сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями (см. рис. 9.35).

Ток I_c называют током ротора и в расчетах обозначают I_2 .

Учитывая, что

$$I_{кл} = I_c / \Delta = I_2 / \Delta, \quad (9.167)$$

где $\Delta = 2\sin \frac{\pi p}{Z_2}$ — (см. § 9.7), из (9.167), получаем

$$r_2 = r_c + 2 \frac{r_{кл}}{\Delta^2} \quad (9.168)$$

где

$$r_c = \rho_c \frac{l_c}{q_c} k_r; \quad (9.169)$$

$$r_{kl} = \rho_{kl} \frac{\pi D_{kl,sp}}{Z_2 q_{kl}}. \quad (9.170)$$

В этих выражениях I_c — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м; $D_{kl,sp}$ — средний диаметр замыкающих колец, м (см. рис. 9.37):

$$D_{kl,sp} = D_2 - h_{kl}; \quad (9.171)$$

q_c — сечение стержня, м^2 ; k_r — коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока; при расчете рабочих режимов в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального для всех роторов принимают $k_r = 1$; q_{kl} — площадь поперечного сечения замыкающего кольца, м^2 ; r_c и r_{kl} — соответственно удельные сопротивления материала стержня и замыкающих колец, $\text{Ом}\cdot\text{м}$, при расчетной температуре (см. табл. 5.1).

Сопротивление r_2 для дальнейших расчетов должно быть приведено к числу витков первичной обмотки. Выражение коэффициента приведения для сопротивления фазы короткозамкнутого ротора получают, подставляя в (9.151) значения $m_2 = Z_2$, $w_2 = 1/2$, $k_{ob2} = 1$ и учитывая влияние скоса пазов:

$$\nu_{12} = 4m \frac{(w_1 k_{ob1})^2}{Z_2 k_{ck}^2}, \quad (9.172)$$

где коэффициент скоса пазов (по 3.17)

$$k_{ck} = 2 \sin \frac{\gamma_{ck}}{2} / \gamma_{ck}; \quad \gamma_{ck} = \pi \frac{2p}{Z_2} \beta_{ck}.$$

Обычно значения β_{ck} выражают в долях зубцовогоделения ротора t_{z2} . При скосе пазов ротора на одно зубцовое деление статора $\gamma_{ck} = \pi 2p / Z_1$. В этом случае в двигателях с $2p = 2$ из-за малости угла γ_{ck} принимают $k_{ck} = 1$.

Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки короткозамкнутого ротора

$$r'_2 = r_2 \nu_{12}. \quad (9.173)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается по той же формуле, что и для статора с фазными роторами, т. е.

$$x = 1,58 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_s}{pq} (\lambda_\Pi + \lambda_\Lambda + \lambda_\Delta), \quad (9.174)$$

Входящий в формулу коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния λ_Π определяют в зависимости от конфигурации пазов по формулам табл. 9.26.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния λ_Λ определяется по (9.159).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния λ_Δ определяют по формуле

$$\lambda_{\Delta} = \frac{t_{z1}}{12\delta k_{\delta}} \xi. \quad (9.174a)$$

в которой ξ , находят следующим образом.

При открытых пазах статора и отсутствии скоса статора или ротора

$$\xi = (2 \frac{t_{z2}}{t_{z1}} - \frac{t_{z1}}{t_{z2}} \Delta_z) k_{\beta} - k_{OB}^2 (\frac{t_{z2}}{t_{z1}})^2. \quad (9.175)$$

При полуоткрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2 k'_{CK} k_{\beta} - k_{OB}^2 (\frac{t_{z2}}{t_{z1}})^2 (1 + \beta_{CK}^2). \quad (9.176)$$

В этих формулах t_{z1} и t_{z2} — зубцовые деления статора и ротора; Δ_z определяют по кривой рис. 9.51, а, k_{β} определяют по (9.155) или (9.158); $\beta_{CK} = \beta_{CK}/t_{z2}$ — скос пазов, выраженный в долях зубцового деления ротора. При отсутствии скоса пазов $b_{CK} = 0$; k'_{CK} определяют по кривым рис. 9.51, д в зависимости от t_{z2}/t_{z1} и β_{CK} (при отсутствии скоса пазов — по кривой, соответствующей $\beta_{CK} = 0$).

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора определяют по формуле

$$x_2 = 7,9 f_1 l_{\delta}^{'} 10^{-6} (\lambda_{II} + \lambda_{I\prime} + \lambda_{\Delta} + \lambda_{CK}), \quad (9.177)$$

полученной после подстановки в (9.152) значений $m_2 = Z_2$ и $q_2 = 1/(2p)$ обмотки короткозамкнутого ротора и введения дополнительного слагаемого λ_{CK} .

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора рассчитывают по приведенным в табл. 9.27 формулам в зависимости от конфигурации паза ротора (рис. 9.52).

Таблица 9.27. Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов

Рисунок	Расчетные формулы
9.52, а	$\left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{III}}{2b_1} \right] k_{\Delta} + \frac{h_{III}}{b_{III}}$
9.52, б	$\left(\frac{h_0}{3b_{II}} + \frac{3h_2}{b_{II} + 2b_{III}} \right) k_{\Delta} + \frac{h_{III}}{b_{III}}$
9.52, в	$\frac{h_0}{3b_{II}} k_{\Delta} + \frac{h_{III}}{b_{III}}$
9.52, г	$\left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{III}}{2b_1} \right] k_{\Delta} + \frac{h_{III}}{b_{III}}$
9.52, д	$(0,785 - \frac{b_{III}}{2d_{II}}) k_{\Delta} + \frac{h_{III}}{h_{II}}$

При расчете номинального режима двигателя во всех формулах $k_{\Delta} = 1$.

При закрытых пазах ротора любой конфигурации (рис. 9.52, а—д) в расчетных формулах табл. 9.27 нужно при шлищах по рис. 9.52, е слагаемые $h_{ш}/b_{ш}$ заменить на $0,3 + 1,12 \cdot 10^6 h'_{ш} / I_2$, по рис. 9.52, ж — на $h_{ш}/b_{ш} + 1,12 \cdot 10^6 h'_{ш} / I_2$, где $h'_{ш}$ — толщина ферромагнитной перемычки над пазом, м; I_2 — ток ротора, А.

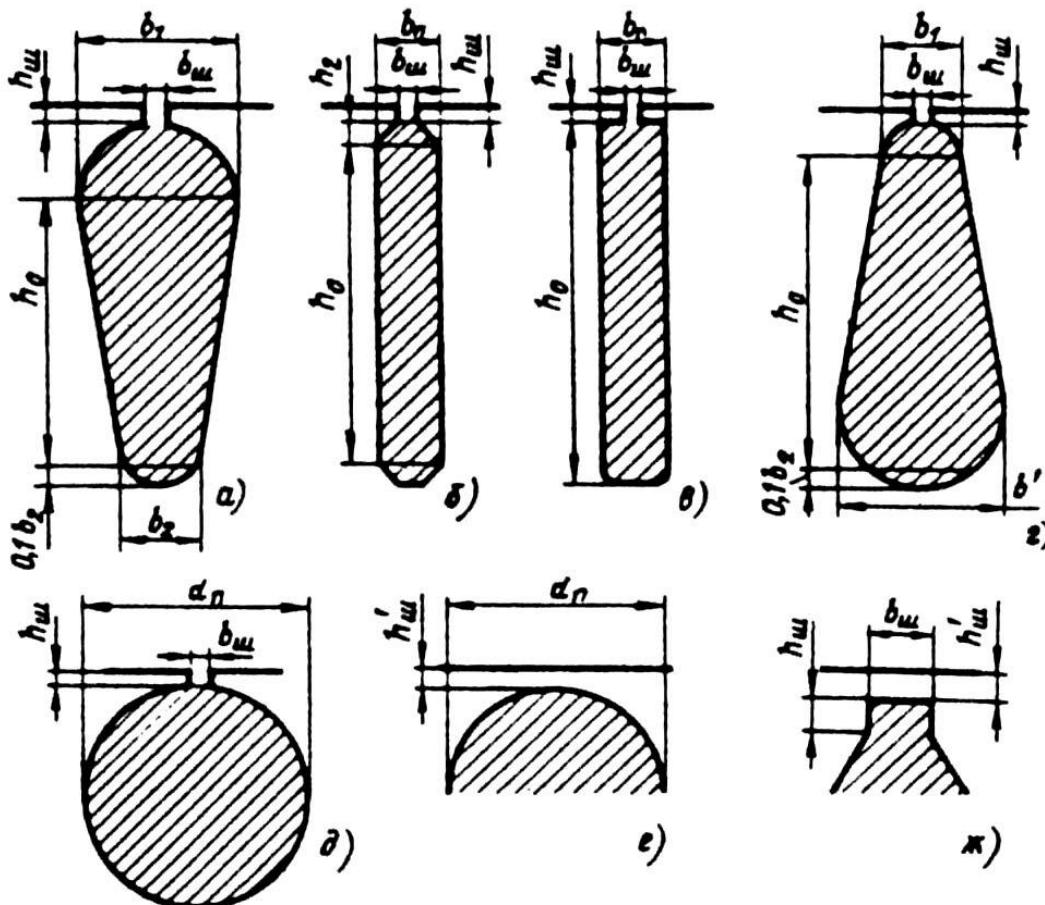


Рис. 9.52. К расчету коэффициентов магнитной проводимости
пазового рассеяния короткозамкнутых роторов:
а — д — полузакрытые пазы; е, ж — закрытые пазы

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитывают в зависимости от размеров и расположения замыкающих колец обмотки по следующим формулам.

В роторах с литыми обмотками при замыкающих кольцах, прилегающих к торцам сердечника ротора (см. рис. 9.37, б), используют формулу

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3D_{КЛ.СР.}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{КЛ.СР.}}{h_{КЛ} + 2b_{КЛ}}. \quad (9.178)$$

Если замыкающие кольца отставлены от торцов ротора (см. рис. 9.37, а), как, например, в обмотке, выполненной из медных или латунных стержней, впаянных в замыкающие кольца, расчет проводят по формуле

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3D_{КЛ.СР.}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{КЛ.СР.}}{2(h_{КЛ} + b_{КЛ})}. \quad (9.179)$$

В этих формулах $D_{КЛ.СР.}$ — средний диаметр замыкающих колец по (9.171); $\Delta = 2 \sin \pi\rho/Z_2$ — коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне; $h_{КЛ}$ и $b_{КЛ}$ — средние высота и ширина колец (см. рис. 9.37); l'_δ — по (9.154).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки, короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{\mu_2} = \frac{t_z}{12\delta k_\sigma} \xi. \quad (9.180)$$

где

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \rho}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - (p/Z_2)^2} \quad (9.181)$$

Δ_z находят по кривым рис. 9.51, а.

Как видно из (9.181), при большом числе пазов ротора, приходящихся на пару полюсов: $Z_2/p \geq 10$, без заметной погрешности можно принять $\xi = 1$.

Коэффициент проводимости скоса, учитывающий влияние на ЭДС обмотки ротора скоса пазов,

$$\lambda_{CK} = (t_{z2} \beta_{CK}^2) / (12k_\sigma k_\mu), \quad (9.182)$$

где β_{CK} — скос пазов, выраженный в зубцовых делениях ротора. При скосе пазов на одно зубцовое деление ротора $\beta_{CK} = 1$; k_μ — коэффициент насыщения магнитной цепи (по 9.129).

Приведенное к числу витков обмотки статора индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора

$$x'_2 = x_2 \gamma_{12} \quad (9.183)$$

где γ_{12} — по (9.172).

Сопротивление схемы замещения r_μ (см. рис. 9.47, а) является расчетным. Введением его в схему замещения учитывают влияние потерь в стали статора на процессы в асинхронной машине, поэтому значение сопротивления r_μ должно быть принято таким, чтобы выделяющаяся в нем активная мощность была равна мощности, затрачиваемой на потери в стали в реальной машине и отнесенной к одной фазе. Таким образом, $r_\mu = P_{CT}/(m I_{0a}^2)$, так как активные потери в стали определяются активной составляющей тока холостого хода, I_{0a} . Из схемы замещения $r_\mu = E_1^2 m_1 / P_{CT}$, где $\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1$.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора x_μ по схеме замещения может быть определено как $x_\mu = E_1 / I_\mu$.

В расчетной практике параллельное включение сопротивлений r_μ и x_μ оказалось удобнее заменить последовательно включенными сопротивлениями r_{12} и x_{12} (см. рис. 9.47, б), значения которых определяют из условия

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_\mu = \frac{j r_\mu x_\mu}{r_\mu + j x_\mu} = r_{12} + j x_{12},$$

откуда

$$r_{12} = \frac{x_\mu^2 r_\mu}{r_\mu^2 + x_\mu^2} \quad \text{и} \quad x_{12} = \frac{r_\mu^2 x_\mu^2}{r_\mu^2 + x_\mu^2}$$

Так как в асинхронных машинах $r_\mu \leq x_\mu$, то $x_{12} \approx x_\mu$, а $r_{12} \ll x_{12}$. В связи с этим значение r_1 не играет заметной роли при анализе процессов в машине, и в расчетах им часто пренебрегают.

Сопротивления r_1 и x_{12} с достаточной для обычных расчетов точностью определяют по следующим формулам:

$$r_{12} = P_{\text{ст.осн}} / (m I^2_\mu); \quad (9.184)$$

$$x_{12} = \frac{U_{1HOM} - I_\mu x_1}{I_\mu} = \frac{U_{1HOM}}{I_\mu} - x_1 \quad (9.185)$$

9.10.4. Относительные значения параметров

Для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчета характеристик параметры асинхронных машин выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора.

Значения параметров, выраженные в относительных единицах, отмечают звездочкой:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}}; r_{1*} = r_1 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}}; \\ x_{12*} &= x_{12} \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}}; \\ x'_{2*} &= x'_2 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}}; r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}}; \\ r_{12*} &= r_{12} \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}}. \end{aligned} \right\} \quad (9.186)$$

Относительные значения одних и тех же параметров схемы замещения различных асинхронных двигателей нормального исполнения незначительно отличаются друг от друга.

Так, относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора большей частью находятся в пределах $x_1 = 0,08...0,14$ и $x'_2 = 0,1...0,16$.

Относительные значения сопротивлений взаимной, индукции, как правило, в 30—40 раз больше, чем x_{1*} . Обычно $x_{12*} = 2...4$.

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора близки друг к другу и обычно составляют несколько сотых долей: $r_{1*} \approx r'_{2*} \approx 0,02...0,03$; лишь, в машинах малой мощности их значения несколько увеличиваются.

Сопротивление r_{12*} обычно составляет $0,05...0,2$.

9.11. ПОТЕРИ И КПД

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические, вентиляционные, механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в стали в асинхронных двигателях рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = s f_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны [6].

В пусковых режимах f_2 близка к f_1 и потери в стали ротора соответственно возрастают, однако при расчете пусковых характеристик потери находят только для определения нагрева ротора за время пуска. Наибольшими потерями в пусковых режимах являются электрические потери в обмотках. Они во много раз превышают потери номинального режима, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора при больших скольжениях не вносит сколько-нибудь заметной погрешности в расчет.

Основные потери в стали статоров асинхронных машин определяют в соответствии с (6.4) по следующей формуле:

$$P_{cm.osn} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 (k_{da} B_a^2 m_a + k_{dz} B_{z1cp}^2 m_{z1}), \quad (9.187)$$

где $p_{1,0/50}$ — удельные потери (табл. 9.28) при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц; β — показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания; для большинства электротехнических сталей $\beta = 1,3...1,5$; k_{da} и k_{dz} — коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью меньше 250 кВт приближенно можно принять $k_{da} = 1,6$ и $k_{dz} = 1,8$; для машин большей мощности $k_{da} = 1,4$ и $k_{dz} = 1,7$; B_a и B_{z1cp} — индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл; m_a , m_{z1} — масса стали ярма и зубцов статора, кг:

$$m_a = \pi(D_a - h_a) h_a l_{cm1} k_{cl} \gamma_c; \quad (9.188)$$

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{cm1} k_{cl} \gamma_c; \quad (9.189)$$

h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = 0,5(D_a - D) - h_{n1};$$

h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м; b_{z1cp} — средняя ширина зубца статора, м:

$$b_{z1cp} = (b_{z1max} + b_{z1min})/2;$$

γ_c — удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Таблица 9.28. Удельные потери в стали, Вт/кг, толщиной 0,5 мм при индукции $B = 1$ Тл и частоте перемагничивания $f = 50$ Гц

Марка стали	Удельные потери, Вт/кг	Марка стали	Удельные потери, Вт/кг
2013	2,5	2312	1,75
2212	2,2	2412	1,3
2214	2		

Добавочные потери в стали (добавочные потери холостого хода) подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Для определения поверхностных потерь вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора (рис. 9.53, а), Тл:

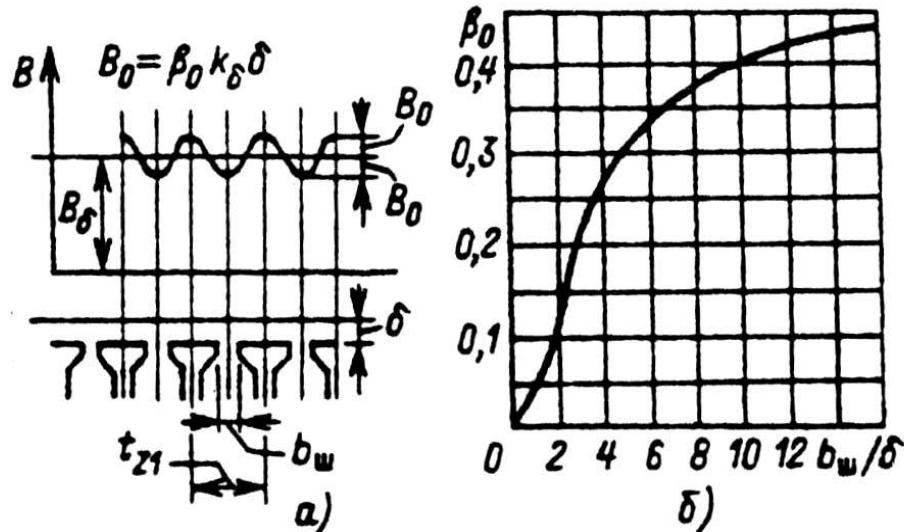


Рис. 9.53. К расчету поверхностных потерь в асинхронных машинах:
а — пульсация индукции в воздушном зазоре;
б — зависимость $\beta_0 = f(b_w / \delta)$

$$B_{0I(2)} = \beta_{0I(2)} k_\delta B_\delta. \quad (9.190)$$

Для зубцов статора β_{01} зависит от отношения ширины шлица пазов ротора к воздушному зазору: $\beta_{01} = f(b_{w2} / \delta)$; для зубцов ротора — от отношения ширины шлица пазов статора к воздушному зазору: $\beta_{02} = f(b_{w1} / \delta)$. Зависимость $\beta_0 = f(b_w / \delta)$ приведена на рис. 9.53, б.

По B_0 и частоте пульсаций индукции над зубцами, равной Z_{2n} для статора и Z_{1n} для ротора, рассчитывают удельные поверхностные потери, т. е. потери, приходящиеся на 1m^2 поверхности головок статора и ротора:

для статора

$$P_{nov1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Z_2 n}{10000}\right)^{1,5} (B_{0,1} t_{z2} \cdot 10^3)^2; \quad (9.191)$$

для ротора

$$P_{nov2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000}\right)^{1,5} (B_{0,2} t_{z1} \cdot 10^3)^2; \quad (9.192)$$

В этих выражениях $k_{01(02)}$ — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери; если поверхность не обрабатывается (двигатели мощностью до 160 кВт, сердечники статоров которых шихтуют на цилиндрические оправки), то $k_{01(02)} = 1,4 \dots 1,8$, при шлифованных поверхностях (наружная поверхность роторов машин средней и большой мощности и внутренняя поверхность статора двигателей $P_2 > 160$ кВт) $k_{01(02)} = 1,7 \dots 2,0$; $n = n_c (1 - s) \approx n_c$ — частота вращения двигателя, об/мин.

Полные поверхностные потери статора, Вт,

$$P_{nov1} = p_{nov1} (t_{z1} - b_{w1}) Z_1 l_{cm1}. \quad (9.193)$$

Полные поверхностные потери ротора, Вт,

$$P_{nov2} = p_{nov2} (t_{z2} - b_{w2}) Z_2 l_{cm2}. \quad (9.194)$$

Для определения пульсационных потерь вначале находится амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов $B_{\text{пул}}$, Тл:

для зубцов статора

$$B_{nyll} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{z1}} B_{z1cp}; \quad (9.195)$$

для зубцов ротора

$$B_{nyll2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{z2}} B_{z2cp}. \quad (9.196)$$

В этих формулах B_{z1cp} и B_{z2cp} — средние индукции в зубцах статора и ротора, Тл:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{(b_{u1}/\delta)^2}{5 + b_{u1}/\delta}; \\ \gamma_2 &= \frac{(b_{u2}/\delta)^2}{5 + b_{u2}/\delta}. \end{aligned} \right\} \quad (9.197)$$

При открытых пазах на статоре или на роторе при определении γ_1 и γ_2 в (9.197) вместо $b_{ш1}$ или $b_{ш2}$ подставляют расчетную ширину раскрытия паза, равную:

$$b'_{u1(2)} = \frac{b_{u1(2)}}{3} \left(1 + \frac{0,5t_{z1(2)}}{t_{z1(2)}b_{u1(2)} + k_\delta} \right) \quad (9.198)$$

(индекс 1 при расчете $b'_{ш1}$, индекс 2 при расчете $b'_{ш2}$).

Значения коэффициента k_δ в зависимости от отношения δ_n/δ для открытых пазов приведены на рис. 9.54.

Пульсационные потери в зубцах статора

$$P_{nyll} \approx 0,11 \left(\frac{Z_2 n}{1000} B_{nyll} \right)^2 m_{z1}; \quad (9.199)$$

пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{nyll2} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{nyll2} \right)^2 m_{z2}; \quad (9.200)$$

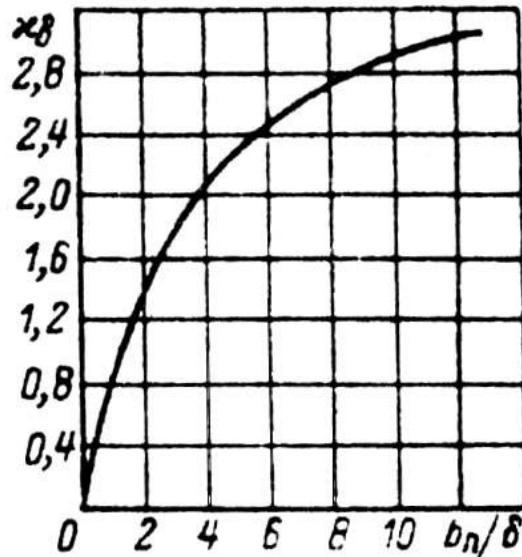


Рис. 9.54. К расчету пульсационных потерь в асинхронных машинах

В этих формулах m_{z1} — масса стали зубцов статора, кг, определяется по (9.189); m_{z2} — масса стали зубцов ротора, кг:

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2cp} l_{cm2} k_{c2} \gamma_c \quad (9.201)$$

где h_{z2} — расчетная высота зубца ротора, м; b_{z2cp} — средняя ширина зубца ротора, м:

$$b_{z2cp} = (b_{z2max} + b_{z2min}) / 2.$$

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с и короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно малы, так как в пазах таких роторов b_{zh2} мало и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не проводят.

В общем случае добавочные потери в стали

$$P_{cm dob} = P_{nov1} + P_{nyu1} + P_{nov2} + P_{nyu2} \quad (9.202)$$

и полные потери в стали асинхронных двигателей

$$P_{cm} = P_{cm.osn} + P_{cm.dob}. \quad (9.203)$$

Обычно $P_{cm.dob}$ приблизительно в 5—8 раз меньше, чем $P_{cm.osn}$.

Электрические потери в асинхронных двигателях рассчитывают раздельно в обмотках статоров и роторов.

Электрические потери во всех фазах обмотки статора, Вт,

$$P_{el} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (9.204)$$

Электрические потери во всех фазах обмотки фазного ротора, Вт,

$$P_{\vartheta 2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1'^2 r_2'. \quad (9.205)$$

Электрические потери в обмотке короткозамкнутого ротора, Вт,

$$P_{\vartheta 2} = m_2 I_2^2 r_2 = Z_2 I_2^2 r_2 \quad (9.206)$$

или

$$P_{\vartheta 2} = m_1 I_1'^2 r_2'. \quad (9.207)$$

Электрические потери в щеточном контакте $P_{\vartheta,ш}$, Вт, фазных роторов асинхронных двигателей, не имеющих приспособлений для подъема щеток и замыкания накоротко контактных колец приnomинальном режиме работы,

$$P_{\vartheta,ш} = m_2 \Delta U_{ш} I_{к.к}, \quad (9.208)$$

где $\Delta U_{ш}$ — падение напряжения в скользящем контакте щетка — кольцо, В; принимается в зависимости от марки щеток по табл. П 4.2; $I_{к.к}$ — ток в кольце, А; при соединении обмотки ротора в звезду $I_{к.к} = I_2$; при соединении обмотки ротора в треугольник (при $m_2 = 3$) $I_{к.к} = \sqrt{3} I_2$.

Механические и вентиляционные потери в асинхронных двигателях рассчитывают по приближенным формулам, полученным из опыта проектирования и эксплуатации двигателей. Коэффициент трения (K_t) учитывает конструкцию, скорость вращения, число пар полюсов, мощность двигателя. Его размерность изменяется в зависимости от вида формулы для определения $P_{мех}$ (9.209 — 9.213).

Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в двигателях с радиальной системой вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с короткозамкнутым ротором и вентиляционными лопатками на замыкающих кольцах, Вт,

$$P_{мех} \approx K_m (n / 1000)^2 (10D)^3; \quad (9.209)$$

$K_t = 5$ при $2p = 2$; $K_t = 6$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м;

$K_t = 6$ при $2p = 2$; $K_t = 7$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a > 0,25$ м.

В двигателях с внешним обдувом ($0,1 \leq D_a \leq 0,5$ м)

$$P_{мех} = K_m (n / 10)^2 D_a^4; \quad (9.210)$$

$K_t = 1$ для двигателей с $2p = 2$ и $K_t = 1,3(1 - D_a)$ при $2p \geq 4$.

В двигателях с радиальной системой вентиляции средней и большой мощности

$$P_{мех} = 1,2 \cdot 2 p \tau^3 (n_k + 1,1) \cdot 10^3 \quad (9.211)$$

где n_k — число радиальных вентиляционных каналов; при отсутствии радиальных каналов $n_k = 0$.

В двигателях с аксиальной системой вентиляции

$$P_{мех} = K_m (n / 1000)^2 (10 D_{вент})^3, \quad (9.212)$$

где $D_{\text{вент}}$ — наружный диаметр вентилятора, м; в большинстве конструкций можно принять $D_{\text{вент}} \approx D_a$; $K_t = 2,9$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м; $K_t = 3,6$ для двигателей с $D_a = 0,25...0,5$ м.

В двигателях большой мощности ($0,5 < D_a < 0,9$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_m (10D_a)^3 \quad (9.213)$$

В этом выражении коэффициент K_t принимается по табл. 9.29.

Таблица 9.29. К расчету механических потерь
двигателей большой мощности

$2p$	2	4	6	8	10	12
K_t	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Потери на трение щеток о контактные кольца, Вт, рассчитывают для двигателей с фазными роторами при отсутствии приспособлений для подъема щеток и закорачивания контактных колец в номинальном режиме работы:

$$P_{\text{тр.щ}} = K_{\text{тр}} \rho_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_k, \quad (9.214)$$

где $K_{\text{тр}}$ — коэффициент трения щеток о контактные кольца (обычно принимается равным 0,16—0,17); $\rho_{\text{щ}}$ — давление на контактной поверхности щеток, кПа (см. табл. П 4.2); $S_{\text{щ}}$ — общая площадь контактной поверхности всех щеток, м^2 ; v_k — линейная скорость поверхности контактных колец, м/с.

Добавочные потери при нагрузке асинхронных двигателей возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т. е. токов между стержнями, замыкающих через листы сердечника ротора. Эти токи особенно заметны при скошенных пазах ротора. В таких двигателях, как показывает опыт эксплуатации, добавочные потери при нагрузке могут достигать 1...2 % (а в некоторых случаях даже больше) от подводимой мощности. ГОСТ устанавливает редкие расчетные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5 % номинальной потребляемой мощности. При расчетах потерь и КПД двигателей в режимах, отличных от номинального, значение добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату токов:

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.ном}} (I/I_{\text{ном}})^2. \quad (9.215)$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \sum P/P_1, \quad (9.216)$$

где $\sum P$ — сумма всех потерь в двигателе, Вт.

Ток холостого хода двигателя

$$I_{x.x} = \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{x.x.p}^2} \quad (9.217)$$

При определении активной составляющей тока холостого хода принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе двигателя такие же, как и при номинальном режиме. При этом условии

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{cm} + P_{mex} + P_{elx.x}}{mU_{1nom}} \quad (9.218)$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными:

$$P_{elx.x} = m I_\mu^2 r_1. \quad (9.219)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{x.x.p} \approx I_\mu \quad (9.220)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{x.x} = I_{x.x.a} / I_{x.x}. \quad (9.221)$$

9.12. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости P_1 , I_1 , $\cos\varphi$, η , $s_1 = f(P_2)$. Часто к ним относят также зависимости $M = f(P_2)$ и I_2 или $I'_2 = f(P_2)$ [6].

Методы расчета характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения (рис. 9.55). Г-образная схема получена из Т-образной схемы замещения (см. рис. 9.47), в которой ветвь, содержащая параметр Z_{12} , вынесена на вход схемы. Т-образная и Г-образная схемы идентичны для данной конкретной ЭДС, для которой рассчитывают комплексный коэффициент c_1 , равный взятому с обратным знаком отношению вектора напряжения фазы \dot{U}_1 к вектору ЭДС — \dot{E}_1 .

В асинхронных двигателях при изменении тока от синхронного холостого хода до номинального \dot{E}_1 изменяется незначительно. Поэтому для получения рабочих характеристик коэффициент c_1 , рассчитывают для синхронного холостого хода и принимают его значение неизменным. Это не вносит заметных погрешностей в расчет характеристик, так как значение коэффициента c_1 , во всем диапазоне изменения нагрузки от $P_2 = 0$ до $P_2 = P_{2nom}$ изменяется лишь в третьем или четвертом знаке.

Корректировку коэффициента c_1 , обычно производят лишь при расчете пусковых характеристик или режимов работы двигателя с большими скольжениями, при которых ток статора существенно превышает номинальный.

Для расчета рабочих характеристик коэффициент определяют из выражения

$$c_1 = \frac{\dot{Z}_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = 1 + \frac{\dot{Z}_1}{Z_{12}} = c_1 e^{-j\gamma},$$

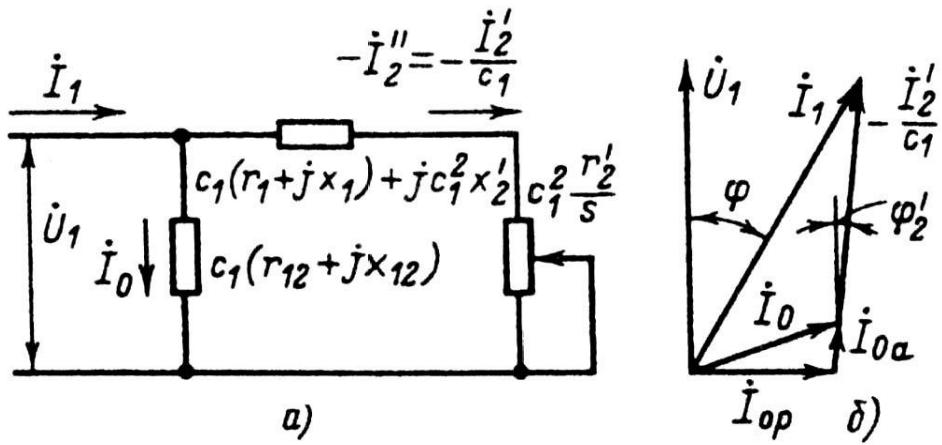


Рис. 9.55. Г-образная схема замещения асинхронной машины (а) и соответствующая ей векторная диаграмма (б)

где

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_2)}. \quad (9.222)$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2 — 3 кВт, как правило, $|\gamma| \leq 1^\circ$, поэтому реактивной составляющей коэффициента c_1 , можно пренебречь, тогда приближенно

$$\dot{C}_1 \approx C_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}. \quad (9.223)$$

При более точных расчетах определяют и активную, и реактивную составляющие C_1 по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} C_{1a} &= \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})_1}{r_{12}^2 + x_{12}^2} \\ C_{1p} &= \frac{x_1 r_{12} - r_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} \end{aligned} \right\} \quad (9.224)$$

Полное значение

$$C_1 = \sqrt{C_{1a}^2 + C_{1p}^2} \quad (9.225)$$

Как видно, выражение (9.223) может быть получено из (9.225) при условии $r_{12} \ll x_{12}$ и $r_1 \ll x_{12}$, что практически всегда имеет место в асинхронных машинах мощностью $P_2 \geq 2 \dots 3$ кВт. При этих же условиях $C_{1p} \approx 0$ и $C_{1a} = C_1$.

Рабочие характеристики можно рассчитать по круговой диаграмме или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях и может быть легко переведен на язык программ при использовании в расчетах ЭВМ.

Аналитический метод расчета. В настоящее время практически все расчеты проводят аналитическим методом. Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в табл. 9.28 в удобной для ручного счета последовательности. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s \approx (0,2...1,5) s_{\text{ном}}$. Номинальное скольжение можно предварительно взять при $s_{\text{ном}} \approx r_2'$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти - шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы (см. пример расчета).

Перед началом расчета рекомендуется выписать значения постоянных, не зависящих от скольжения величин, как это показано в формуляре и в примере расчета. К таким величинам относятся номинальное напряжение фазы $U_{1\text{ном}}$, сопротивления r_1 и r_2' , сумма потерь $P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}$ (для двигателей с фазным ротором также $P_{\text{тр.щ}}$) и составляющие тока синхронного холостого хода: реактивная $I_{0p} \approx I_{\mu}$ и активная, которую определяют из выражения

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.och}} + 3I_{\mu}^2 r_1}{3U_{1\text{ном}}}, \quad (9.226)$$

Выписывается также значение коэффициента c_1 , определенное по (9.223) или по (9.225), и расчетные величины, обозначенные в формуляре a, a', b и b' . Формулы для их определения зависят от принятого (точного или приближенного) метода расчета c_1 .

Если $|y| \leq 1^\circ$, то можно использовать приближенный метод, так как в этом случае $c_{1p} \approx 0$ и $c_1 \approx 1 + x_1/x_{12}$. Тогда

$$\left. \begin{array}{l} a' = c_1'; \dots; a = c_1 r_1; \\ b' = 0; \dots; b = c_1(x_1 + c_1 x_2'). \end{array} \right\} \quad (9.227)$$

Если же расчет c_1 проводить по уточненным формулам (9.224) и (9.225), то

$$\left. \begin{array}{l} a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2; \dots; a = c_{1a} r_{1p} x_1 - b' x_2'; \\ b' = 2c_{1a}; \dots; b = c_{1a} x_1 + c_{1p} r_1 + a' x_2'. \end{array} \right\} \quad (9.228)$$

Расчет характеристик рекомендуется проводить в следующей последовательности.

Вначале находят активную и реактивную составляющие комплексного сопротивления правой ветви схемы замещения (см. рис. 9.55):

$$Z_{\text{ВЕТВИ}} = c_1(r_1 + jx_1) + j c_1^2 x_2' + c_1^2 \frac{r_2'}{s}, \quad (9.229)$$

где

$$\left. \begin{array}{l} R = c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{s} \\ X = c_1 x_1 + c_1^2 x_2' \end{array} \right\} \quad (9.229a)$$

Из (9.229) с учетом (9.227) или (9.228) получают

$$R = a' \frac{r_2}{s} + a, \quad (9.230)$$

$$X = b; \quad (9.231)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (9.232)$$

Далее находят (см. рис. 9.55)

$$I''_2 = \frac{U_{1\text{ном}}}{Z}, \quad \cos \varphi'_2 = R/Z \quad \text{и} \quad \sin \varphi'_2 = X/Z$$

Составляющие тока статора являются суммами активных и реактивных составляющих токов параллельных ветвей схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} I_{1a} &= I_{01} + I''_2 \cos \varphi'_2; \\ I_{1p} &= I_{0p} + I''_2 \sin \varphi'_2. \end{aligned} \right\} \quad (9.233)$$

Полный ток статора

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}. \quad (9.234)$$

Приведенный ток ротора

$$I'_2 = c_1 I''_2. \quad (9.235)$$

Ход последующих расчетов ясен из приведенных формул в формуляре (табл. 9.30).

Таблица 9.30. Формуляр расчета рабочих характеристик асинхронных двигателей

$$\begin{aligned} P_{\text{ном}} &= \dots; \quad 2p = \dots; \quad U_{1\text{ном}} = \dots \text{В}; \quad I_{1\text{ном}} = \dots \text{А}; \quad I_{0a} = \dots \text{А}; \\ I_{0p} &\approx I_{\mu} = \dots \text{А}; \quad P_{\text{ст}} + P_{\text{тр.щ.}} + P_{\text{мех}} = \dots \text{кВт}; \\ P_{\text{э.щ.ном}} &= \dots \text{кВт}; \quad r_1 = \dots \text{Ом}; \quad r'_2 = \dots \text{Ом}; \quad c_1 = \dots \\ a' &= \dots; \quad a = \dots \text{Ом}; \quad b' = \dots \text{Ом}; \quad b = \dots \text{Ом} \end{aligned}$$

№ п/п	Расчетная формула	Едини- цы вели- чины	Скольжение				
			0,005	0,01	0,015	...	s _{ном}
1	$a' r'_2 / s$	Ом					

2	$b' r'_2 / s$	Ом				
3	$R = a + a' r'_2 / s$	Ом				
4	$X = b + b' r'_2 / s$	Ом				
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом				
6	$I^2 = U_{1\text{ном}} / Z$	A				
7	$\cos \varphi'_2 = R / Z$	-				
8	$\sin \varphi'_2 = X / Z$	-				
9	$I_{1a} = I_{0a} + I''_2 \cos \varphi'_2$	A				
10	$I_{1p} = I_{0p} + I''_2 \sin \varphi'_2$	A				
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	A				
12	$I'_2 = c_1 I''_2$	A				
13	$P_1 = 3 U_{1\text{ном}} I_{1a} 10^{-3}$	кВт				
14	$P_{\vartheta 1} = 3 I_1^2 r_1 10^{-3}$	кВт				
15	$P_{\vartheta 1} = 3 (I_1^1)^2 r'_2 10^{-3}$	кВт				
16	$P_{\vartheta, \text{щ.}} \approx P_{\vartheta, \text{щ.ном.}} (I_1 / I_{1\text{ном}})^*$	кВт				
17	$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$	кВт				
18	$\Sigma P = P_{\text{ср}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ.}} + P_{\vartheta 1} + P_{\vartheta 2} + P_{\vartheta, \text{щ.}} + P_{\text{доб}}$	кВт				
19	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт				
20	$\eta = 1 - \Sigma P / P$	—				
21	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	—				

*Для двигателей с короткозамкнутым ротором $P_{\vartheta, \text{щ.ном.}} = 0$.

После окончания расчета для принятых значений скольжения строится характеристика $s = f(P_2)$, по которой уточняется значение $s_{\text{ном.}}$ соответствующее заданной номинальной мощности $P_{2\text{ном.}}$ (см. пример расчета на рис. 9.77), и заполняется последний столбец формуляра.

В приведенных формулах не учтено возможное изменение параметров при $s > s_{\text{ном.}}$. Поэтому при расчете характеристик двигателей с двухклеточными короткозамкнутыми роторами или с роторами, имеющими фигурные пазы, в которых в повышенной степени проявляется действие эффекта вытеснения тока, для каждого из принятых значений скольжения, больших $s_{\text{ном.}}$, необходимо уточнять значения параметров r'_2 и x'_2 (см. § 9.13).

Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 15 кВт приведены в примере расчета (см. § 9.17).

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме. Круговая диаграмма асинхронного двигателя изображена на рис. 9.56 [5]. Исходными данными для ее построения являются:

ток синхронного холостого хода /о, А,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} \quad (9.236)$$

где I_{0a} – по (9.266); $I_{0p} \approx I_{\mu}$

Коэффициент c_1 рассчитывают по (9.223) или по (9.225).

Сопротивления короткого замыкания

$$\left. \begin{array}{l} x_{k1} = x_1 + c_1 x'_2; \\ r_{k1} = r_1 + c_1 r'_2 \end{array} \right\} \quad (9.237)$$

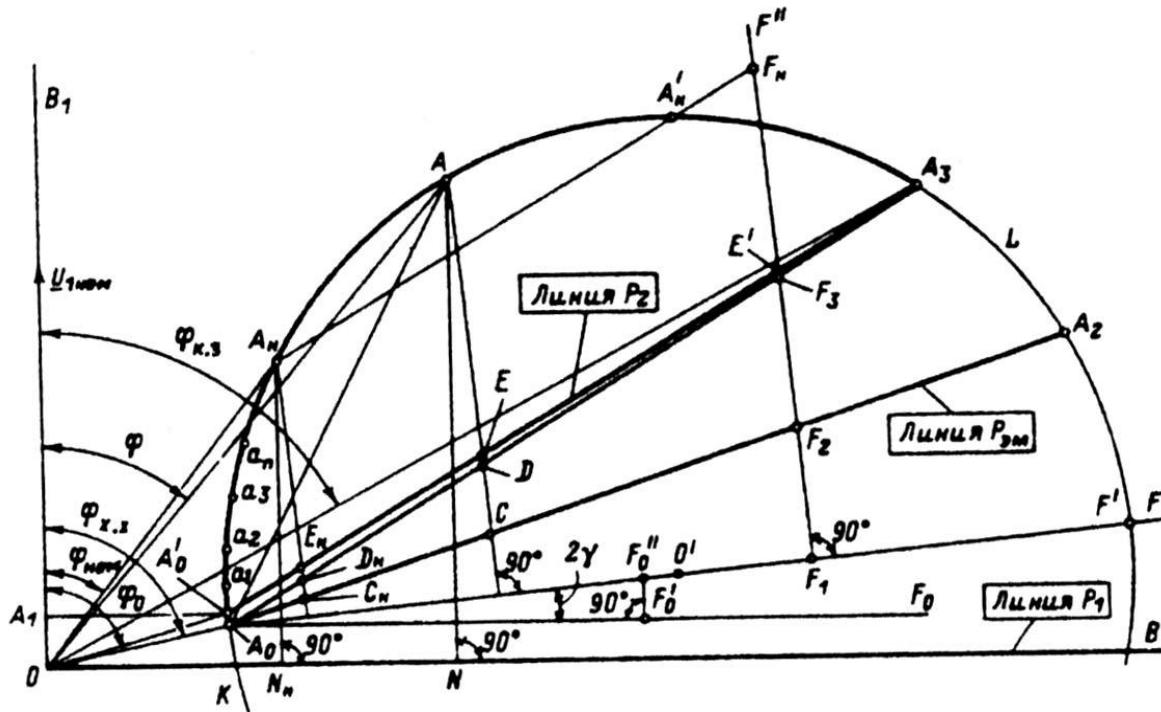


Рис. 9.56. Круговая диаграмма асинхронной машины

Чтобы размеры круговой диаграммы были удобны для работы, целесообразно вначале выбрать ее диаметр DK (в пределах 200...250 мм), после чего рассчитать масштабы: масштаб тока, А/мм: $m_I = \frac{U_{1HOM}}{c_1 x_{k1} D_K}$; масштаб мощности, Вт/мм: $m_P = 3 U_{HOM} m_I$; масштаб момента, Нм/мм: $m_M = m_P / \Omega$, где $\Omega = \frac{2\pi f_1}{P}$.

При построении диаграммы вектор напряжения \dot{U}_{1HOM} направляют по оси ординат OB_1 . Из начала координат строят вектор тока

синхронного холостого хода OA_0 $\frac{1}{m_I} I_0$ — под углом φ_0 к оси ординат $\varphi_0 = \arccos \frac{I_{0a}}{I_0}$. Точку A_0 , удобно найти, отложив по вертикальной и горизонтальной осям ее координаты, соответственно равные I_{0a} и I_{0p} .

Через точку A_0 проводят линии $A_0F_0 \parallel OB$ и A_0F под углом 2γ к оси ординат. Из-за малости γ построение угла $< F_0A_0F$ удобно выполнять следующим образом. В произвольной точке F'_0 прямой A_0F_0 восстанавливают перпендикуляр к линии A_0F_0 и откладывают на нем отрезок

$$|F'_0 F''_0| = |A_0 F'_0| \operatorname{tg} 2\gamma \approx |A_0 F'_0| 2 \operatorname{tg} \gamma;$$

$$tg\gamma = \frac{r_1x_{12} - r_{12}x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}$$

Линия A_0F определяет положение диаметра круговой диаграммы. Отложив на ней отрезок $|A_0O'| = 0,5 D_K$, проводят окружность с центром O' радиусом $0,5D_K$. Через произвольную точку F_1 диаметра A_0F' проводят линию $(F' F_1) \perp (A_0F)$ и откладывают на ней отрезки $|F_1F_2| = |A_0F_1| \frac{r_1}{x_{K1}}$ и $|F_1F_3| = |A_0F_1| \frac{r_{K1}}{x_{K1}}$. Через точку A_0 и точки F_2 и F_3 , проводят прямые до пересечения их с окружностью соответственно в точках A_2 и A_3 . На оси ординат откладывают отрезок $|OA_1| = P_0/m_p$, где $P_0 = P_{ct} + 3 I_0^2 r_1 + P_{meh}$, и через точку A_1 проводят $|A_1A'_0| \parallel BO$. Точку A'_0 соединяют с точками O и A_3 . На этом построение круговой диаграммы заканчивается.

Окружность диаметром D_K и с центром O' является геометрическим местом концов векторов тока статора двигателя при различных скольжениях. Точка окружности A_0 определяет положение конца вектора тока I_0 при синхронном холостом ходе, а точка A'_0 — при реальном холостом ходе двигателя. Отрезок $O A'_0$ определяет ток $I_{x,x}$, а угол $\angle A'_0OB_1 - \cos \varphi_{k,z}$. Точка A_2 окружности определяет положение конца вектора тока при коротком замыкании ($s = 1$), отрезок OA_3 — ток $I_{k,z}$, а угол $\angle A_3OB_1 - \cos \varphi_{k,z}$. Точка A_2 определяет положение конца вектора тока при $s = \infty$.

Промежуточные точки на дуге окружности A_0A_3 определяют положение концов векторов тока I_1 при различных нагрузках в двигательном режиме ($0 < s \leq 1$). Ось абсцисс диаграммы OB является линией первичной мощности P_1 . Линией электромагнитной мощности P_{em} или электромагнитных моментов M_{em} является линия A_0A_2 . Линией полезной мощности на валу (вторичной мощности P_2) является линия A'_0A_3 . По круговой диаграмме для тока статора, которому соответствует точка A на окружности, можно рассчитать необходимые для построения рабочих характеристик данные:

ток статора, $A, I_1 = m_I |OA|$;

ток ротора, $A, I'_2 = m_I |A_0A|$;

первичную мощность, $Bt, P_1 = m_p |AN|$, где $AN \perp OB$;

электромагнитную мощность, $Bt, P_{em} = m_p |AC|$, где $AC \perp A_0F$;

электромагнитный момент $M_{em} = m_m |AC|$;

полезную мощность, $Bt, P_2 = m_p |AE|$;

КПД $|AE| / |AN|$;

коэффициент мощности $\cos \varphi = \cos \angle AOB_1$;

скольжение двигателя $|DC| / |AC|$.

Для построения рабочих характеристик вначале находят положение на окружности точки A_h , которая соответствует номинальному режиму работы. Для этого, исходя из заданной номинальной мощности P_{2nom} , рассчитывают длину отрезка $|EF_h| = P_{2nom} / m_p$ и откладывают на линии $F_1F' \perp A_0F$ от точки ее пересечения E' с линией полезной мощности A'_0A_3 . Через точку F_h проводят $F_hA_h \parallel A'_0A_3$. Точки пересечения F_hA_h с окружностью A_h и A'_h определяют положение концов вектора тока I_1 при мощности P_{2nom} . Точка A_h , ближайшая к A'_0 , соответствует номинальному режиму, точка A'_h — режиму неустойчивой работы двигателя (при $s > s_{kp}$).

Наметив на дуге A_0A_h несколько точек a_1, a_2, a_3, \dots , определяют соответствующие каждой из них данные $I_1, P_1, P_2, \cos \varphi, \eta, M, s$.

Из круговой диаграммы можно найти также приближенное значение кратности максимального момента M_{max} . Оно будет несколько занижено, так же как и в аналитическом расчете без учета изменения параметров от насыщения полями рассеяния и от действия эффекта вытеснения тока.

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме связан с определенными погрешностями при выполнении графических работ. Некоторое уточнение может дать сочетание графического метода и элементов аналитического. Например, I_1 , I_2 и $\cos \phi$ определяются по круговой диаграмме, а суммы потерь, P_2 , P_1 , s и η - расчетным путем, используя данные круговой диаграммы. В этом случае можно также учесть дополнительные потери, которые при построении круговой диаграммы не принимают во внимание [6].

Такая методика расчета иногда применяется на практике. Однако все более широкое распространение ЭВМ делает аналитический метод расчета рабочих характеристик более предпочтительным.

9.13. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Учет эффекта вытеснения тока. С увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается, при этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

В большинстве случаев эффект вытеснения тока в обмотках короткозамкнутых роторов играет положительную роль, так как увеличивает начальные моменты двигателей. Это широко используют при проектировании асинхронных машин, выполняя роторы с глубокими прямоугольными или фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, в которых эффект вытеснения тока проявляется особенно сильно. Однако неравномерное распределение плотности тока по сечению стержня ротора может привести и к нежелательным последствиям. Например, при неудачно выбранных размерных соотношениях стержней чрезмерно возрастающая в пусковых режимах плотность тока в их верхних участках может вызвать неравномерное тепловое удлинение стержней и их изгиб. При этом стержни разрывают усики пазов и выгибаются в воздушный зазор, что неизбежно приводит к выходу двигателя из строя. В связи с этим правильный учет влияния эффекта вытеснения тока является необходимым при проектировании асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами.

В расчетах удобнее определять не непосредственно активное и индуктивное сопротивления стержней при неравномерной плотности тока, а их относительные изменения под действием эффекта вытеснения тока. Эти изменения оценивают коэффициентами k_r и k_d . Коэффициент k_r показывает, на сколько увеличилось активное сопротивление пазовой части стержня $r_{c\xi}$ при неравномерной плотности тока в нем по сравнению с его сопротивлением r_c при одинаковой плотности по всему сечению стержня:

$$k_r = r_{c\xi} / r_c. \quad (9.238)$$

Коэффициент демпфирования k_d показывает, как уменьшилась магнитная проводимость $\lambda_{n\xi}$ участка паза, занятого проводником с током, при действии эффекта вытеснения тока по сравнению с проводимостью того же участка, но при равномерной плотности тока в стержне

$$k_d = \lambda'_{n\xi} / \lambda'_n \quad (9.239)$$

Аналитическими выражениями, определяющими k_r и k_d , полученными для прямоугольных стержней при допущениях о постоянстве удельного сопротивления материала стержня по всей площади его поперечного сечения, бесконечности магнитной проницаемости стали магнитопровода и прямолинейности магнитных линий потока рассеяния в пазу, являются

$$\left. \begin{aligned} k_r &= \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}; \\ k_d &= \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \end{aligned} \right\} \quad (9.240)$$

В этих выражениях ξ , так называемая «приведенная высота» стержня, — величина безразмерная, значение которой определяется по формуле

$$\xi = 2 \pi h_c \sqrt{\frac{b_c f_2}{b_n \rho_{c9}}} 10^{-7} \quad (9.241)$$

где h_c — высота стержня в пазу, м: $h_c = h_p - (h_{ш} + h'_{ш})$; b_c и b_p — ширина стержня и ширина паза, м. При расчете роторов со вставными стержнями принимают $b_c = 0,96 b_p$; в роторах с литой обмоткой — $b_c = b_p$; f_2 — частота тока в роторе в расчетном режиме, Гц; ρ_{c9} — удельное сопротивление материала стержня при расчетной температуре, Ом·м.

Для двигателей общего назначения с медными вставными стержнями короткозамкнутого ротора при расчетной температуре 75° С ($\rho_{c75} = 10^{-6}/47$ Ом•м, см. табл. 5.1) из (9.241) имеем

$$\xi = 96,32 h_c \sqrt{s} \sqrt{\frac{b_c}{b_n}} \quad (9.242)$$

При расчетной температуре 115° С ($\rho_{c115} = 10^{-6}/41$ Ом•м)

$$\xi = 89,96 h_c \sqrt{s} \sqrt{\frac{b_c}{b_n}} \quad (9.243)$$

При литой алюминиевой обмотке ротора при расчетных температурах 75° С ($\rho_{c75} = 10^{-6}/21,5$ Ом•м) и 115° С ($\rho_{c115} = 10^{-6}/20,5$ Ом•м) соответственно имеем

$$\xi = 61,15 h_c \sqrt{s} \quad (9.244)$$

$$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s} \quad (9.245)$$

Анализ зависимостей (9.240) показывает, что при $\xi \leq 1$ эффект вытеснения тока практически не влияет на сопротивления стержней. Это является критерием необходимости его учета при проектировании.

В расчетах условно принимают, что при действии эффекта вытеснения ток ротора распределен равномерно, но не по всему сечению стержня, а лишь по его верхней части, ограниченной высотой h_r , имеющей сечение q_r и сопротивление $r_{c\xi} = r_c q_c / q_r$; h_r называют глубиной проникновения тока в стержень. Для прямоугольных стержней $h_r = h_c / k_r$.

При определении $\lambda_{p\xi}$ аналогично принимают, что ток равномерно распределен по верхней части сечения стержня высотой h_r .

В практических расчетах для определения k_r и k_d пользуются не аналитическими зависимостями (9.240), а построенными на их основе кривыми $\phi(\xi)$ и $\phi'(\xi)$ (рис. 9.57 и 9.58). Принятые при выводе (9.240) допущения приводят к положению, что на глубину проникновения не влияют высота и конфигурация стержня. Это позволяет использовать (9.240) и кривые $\phi(\xi)$ и $\phi'(\xi)$ для определения k_r и k_d в стержнях различных конфигураций. Расчет

проводят в следующей последовательности. По полной высоте стержня, частоте тока и удельному сопротивлению материала стержня из табл. 5.1 по (9.241) определяют функцию ξ , в соответствии с которой по кривым рис. 9.57 находят функцию φ , а по кривым рис. 9.58 — функцию φ' .

Далее определяют глубину проникновения тока

$$h_r = h_c / (1 + \varphi) \quad (9.246)$$

и коэффициент $k_d = \varphi'$.

Коэффициент k_r определяют по отношению площадей всего сечения стержня и сечения, ограниченного высотой h_r , т. е.

$$k_r = q_c / q_r. \quad (9.247)$$

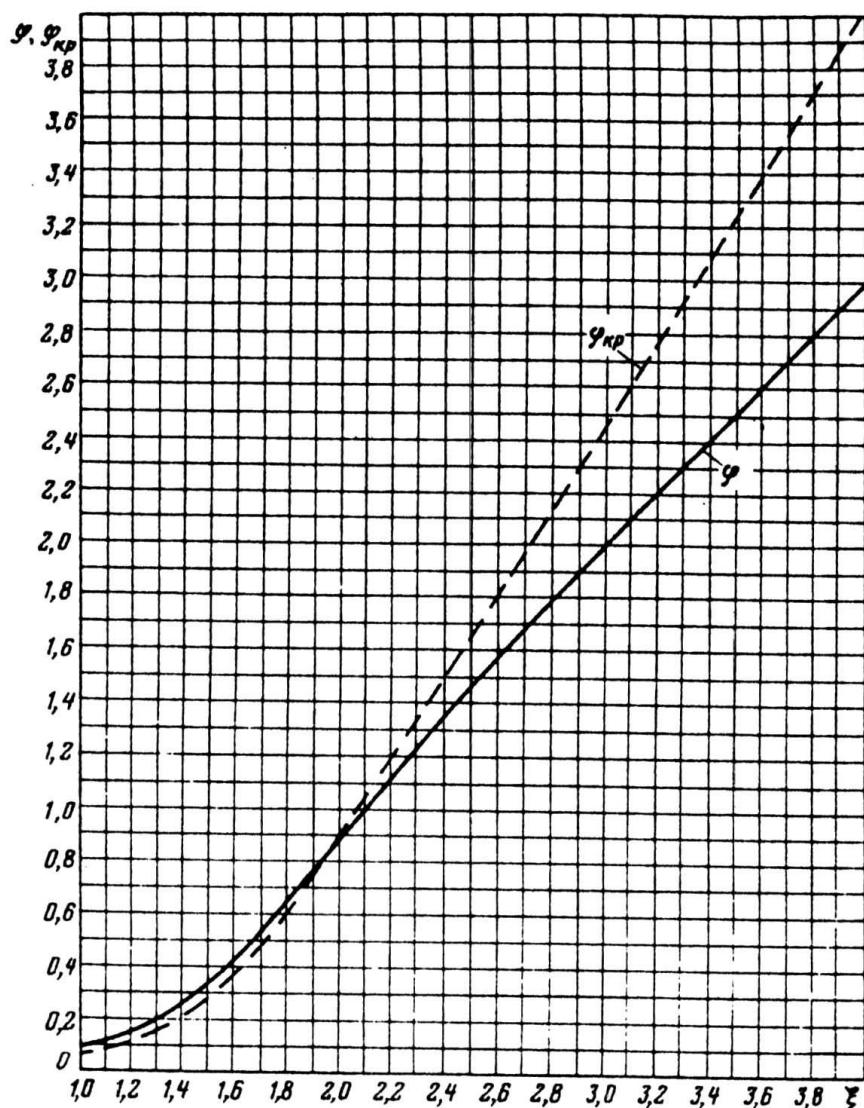


Рис. 9.57. Кривые φ и φ_{kp} в функции “приведенной высоты” ξ ($\varphi = \xi - 1$ при $\xi > 4$ и $\varphi = 0,89\xi^4$ при $\xi < 1$)

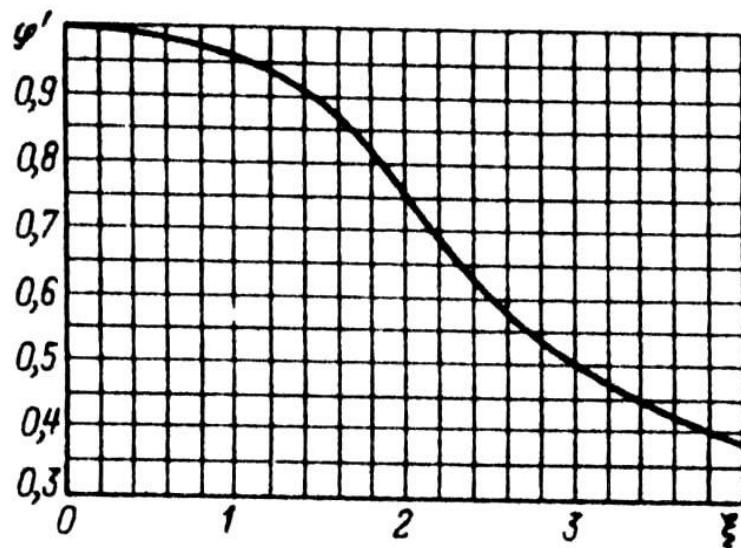


Рис. 9.58. Зависимость ϕ' от “приведенной высоты” ξ : при $\xi > 4$ $\phi = 3/2 \xi$

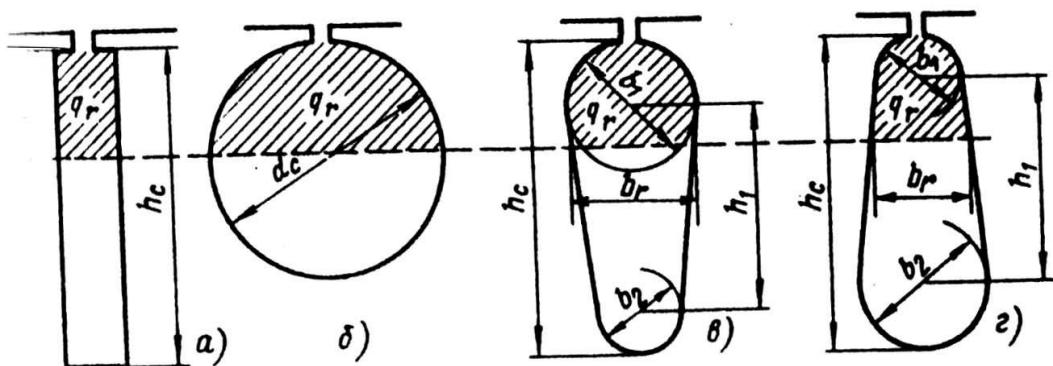


Рис. 9.59. К расчету K_r в стержнях различной конфигурации:
 h_r — расчетная глубина проникновения тока

По значениям k_r и k_d можно найти сопротивление пазовой части стержня обмотки ротора и коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого стержнем с током:

$$r_{c\xi} = k_r r_c; \quad (9.248)$$

$$\lambda'_{n\xi} = k_d \lambda'_n \quad (9.249)$$

Для определения k_r в стержнях некоторых наиболее распространенных конфигураций используют заранее полученные расчетные формулы.

Для прямоугольных стержней (рис. 9.59, а)

$$k_r = q_c / q_r = h_c / h_r = 1 + \varphi. \quad (9.250)$$

Для круглых стержней (рис. 9.59, б)

$$k_r = q_c / q_r = I + \varphi. \quad (9.251)$$

Функция φ_{kp} для круглого стержня представлена на рис. 9.57.

Для грушевидных стержней (рис. 9.59, в)

$$\left. \begin{aligned} k_r &= q_c / q_r \\ q_c &= \frac{\pi(b_1^2 + b_2^2)}{8} + \frac{b_1 + b_2}{2} h \end{aligned} \right\} \quad (9.252)$$

Площадь сечения q_r при $\frac{b_1}{2} \leq h_r \leq h_1 + \frac{b_1}{2}$

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} (h_r - \frac{b_1}{2}), \quad (9.253)$$

где

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} (h_r - \frac{b_1}{2})$$

$$h_r = h_c / (l + \varphi).$$

При $h_r \leq b_1/2$ площадь

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{4(\varphi_{kp} + 1)} \quad (9.254)$$

При $h_r > h_1 + b_1/2$ принимают $q_r \approx q_c$ и $k_r = 1$. Для трапецидальных стержней с узкой верхней частью (см. рис. 9.59, г)

$$k_r = q_c / q_r,$$

q_c определяют по (9.252). Площадь q_r при $h_r \leq b_1/2$ определяют по (9.254) и при $h_r \geq b_1/2$ — по (9.253), причем

$$b_r = b_1 + \frac{b_2 - b_1}{h_1} (h_r - \frac{b_1}{2}) \quad (9.255)$$

Для других конфигураций стержней k_r , может быть определен из общего выражения $k_r = q_c / q_r$ с учетом размерных соотношений стержня и глубины проникновения тока в стержень h_r .

Для расчета характеристик необходимо учитывать изменение сопротивления всей обмотки ротора r_2 поэтому удобно ввести коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = r_{2\xi}/r_2, \quad (9.256)$$

где $r_{2\xi}$ — сопротивление фазы короткозамкнутого ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

Выражение (9.256) легко преобразовать в более удобный для расчета вид:

$$K_R = \frac{r_2 + r'_c(k_r - 1)}{r_2} = 1 + \frac{r'_c}{r_2}(k_r - 1) \quad (9.257)$$

Для прямоугольных стержней это выражение приобретает вид

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2}\varphi. \quad (9.258)$$

В (9.257) и (9.258) для роторов без радиальных вентиляционных каналов с литой обмоткой (с прилегающими замыкающими кольцами) $r'_c = r_c$.

Для роторов с радиальными вентиляционными каналами и роторов с отставляемыми замыкающими кольцами

$$r'_c = r_c \frac{l_c - n_k b_k}{l_2} \quad (9.259)$$

где l_c — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м; n_k и b_k — число и ширина, м, радиальных вентиляционных каналов; l_2 — длина сердечника ротора, м.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения тока будет равно:

$$r_{2\xi} = r_2 K_R. \quad (9.260)$$

Обозначив коэффициентом K_x изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока, получим

$$x_{2\xi} = x_2 K_x, \quad (9.261)$$

тогда

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{\alpha2} + \lambda_{\beta2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{\alpha2} + \lambda_{\beta2}} \quad (9.262)$$

где $\lambda_{n2\xi}$ — коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока:

$$\lambda_{n2\xi} = \lambda_{n2} - \Delta \lambda_{n2\xi}$$

здесь

$$\Delta \lambda_{n2\xi} = \lambda'_{n2} (1 - k_D);$$

$\lambda'_{\text{п2}}$ — коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником с обмоткой (выражение для определения $\lambda'_{\text{п2}}$ в формулах табл. 9.27 является множителем перед коэффициентом k_d).

Влияние насыщения на параметры. В предыдущих параграфах рассматривались методы расчета параметров при допущении отсутствия насыщения стали магнитопровода полями рассеяния, магнитная проницаемость которой принималась равной бесконечности. При расчетах параметров холостого хода и рабочих режимов это допущение вполне оправдано, так как токи в этих режимах относительно малы и потоки рассеяния не создают заметного падения магнитного напряжения в стали зубцов. При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи в обмотках возрастают и потоки рассеяния увеличиваются. Коронки зубцов статора и ротора в машинах средней и большой мощности в большинстве случаев оказываются сильно насыщенными.

Насыщение коронок зубцов (рис. 9.60) приводит к увеличению магнитного сопротивления для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько снижается также магнитная проводимость дифференциального рассеяния. На коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния насыщение стали потоками рассеяния влияния не оказывает.

Уменьшение потока пазового рассеяния из-за насыщения приближенно учитывают введением дополнительного раскрытия паза, равного c_3 . Дополнительное раскрытие c_3 принимается таким, чтобы его магнитное сопротивление потоку рассеяния было равно магнитному сопротивлению насыщенных участков зубцов. При этом условии можно использовать для расчета коэффициент магнитной проводимости паза с учетом насыщения обычные формулы, предполагая, что $\mu_{\text{ст}} = \infty$. Уменьшение $\lambda_{\text{п}}$ из-за насыщения участков зубцов

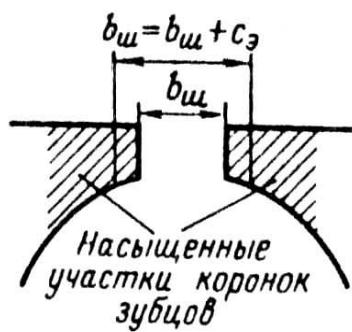


Рис. 9.60. Насыщение участков коронок зубцов потоком рассеяния

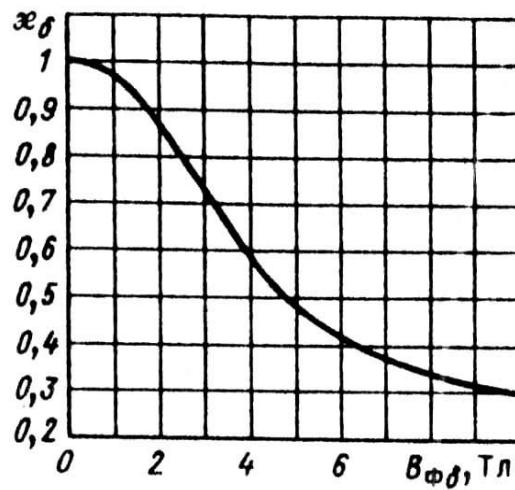


Рис. 9.61. Функция K_s в зависимости от фиктивной индукции B_{ϕ}

$(\Delta\lambda_{\text{п,нас}})$ будет определяться c_3 . Таким образом, c_3 зависит от уровня насыщения верхней части зубцов потоками рассеяния и, следовательно, от МДС паза, т. е. от тока в обмотке. Так как ток обмотки, в свою очередь, зависит от индуктивного сопротивления, определяемого магнитной проводимостью, то расчет приходится проводить методом последовательных приближений. Первоначально задаются предполагаемой кратностью увеличения тока, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны:

$$k_{\text{нас}} = I_{\text{нас}} / I,$$

где I — ток, рассчитанный для данного режима без учета насыщения; $I_{\text{нас}}$ — ток в этом же режиме работы машины при насыщении участков зубцов полями рассеяния.

Ориентировочно для расчета пусковых режимов принимают $k_{\text{нас}} = 1,25 \dots 1,4$; для режима максимального момента $k_{\text{нас}} = 1,1 \dots 1,2$.

Для двигателей с открытыми пазами следует задаваться меньшими значениями $k_{\text{нас}}$, при полузакрытых пазах — большими.

Расчет проводят в следующей последовательности. Определяют среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора:

$$F_{\text{п.ср}} = 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_1 u_{n1}}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} k_{o\delta 1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (9.263)$$

где I_1 — ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения; a — число параллельных ветвей обмотки статора; u_{n1} — число эффективных проводников в пазу статора; k'_β — коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза, вызванное укорочением шага обмотки, рассчитывается по (9.156) или по (9.157); k_{y1} — коэффициент укорочения шага обмотки.

По средней МДС $F_{\text{п.ср}}$ рассчитывают фиктивную индукцию потока рассеяния в воздушном зазоре, T_ℓ :

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{1,6\delta C_N} 10^{-6} \quad (9.264)$$

где коэффициент

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} \quad (9.265)$$

(t_{z1} и t_{z2} — зубцовые деления статора и ротора).

По полученному значению $B_{\phi\delta}$ определяют отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризуемое коэффициентом k_δ , значение которого находят по кривой рис. 9.61.

Далее рассчитывают значения дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора и ротора ($c_{\vartheta 1}$ и $c_{\vartheta 2}$), магнитные напряжения которых будут эквивалентны МДС насыщенных участков усиков зубцов. Для пазов статора его принимают равным:

$$c_{\vartheta 1} = (t_{z1} - b_{uu1})(1 - k_\delta). \quad (9.266)$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния открытого паза (рис. 9.62, а)

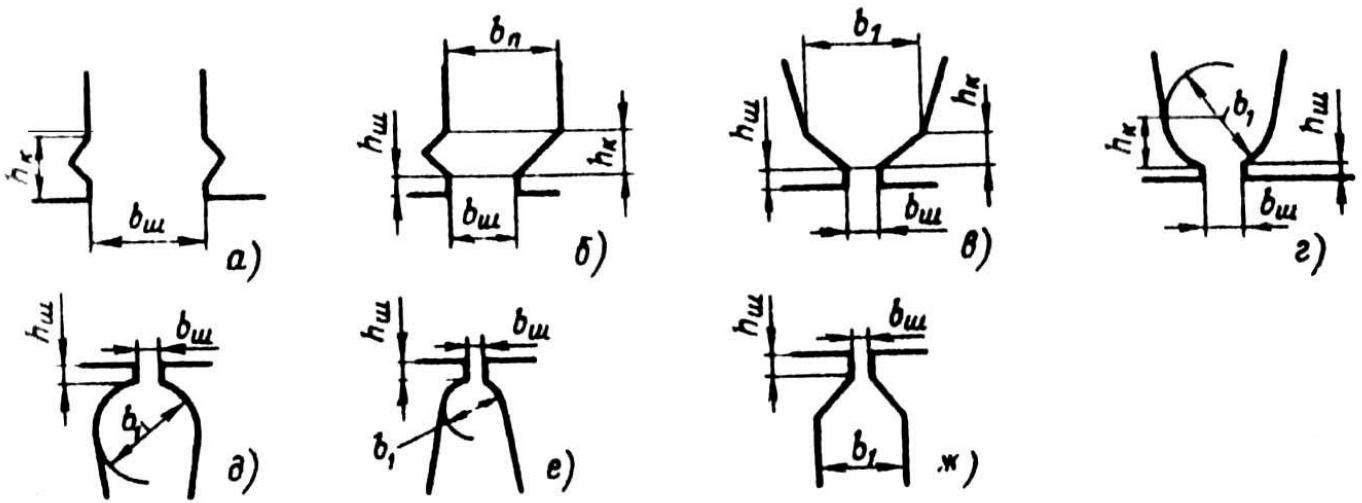


Рис. 9.62. К расчету влияния насыщения потоком рассеяния на коэффициент магнитной проводимости паза:
а—ж — различные конфигурации верхней части пазов

$$\Delta \lambda_{\text{IIHAC}} = \frac{h_k}{b_w} \frac{c_{\vartheta 1}}{b_w + c_{\vartheta 1}} \quad (9.267)$$

Для полуоткрытых и полузакрытых пазов расчетная формула несколько усложняется из-за более сложной конфигурации их верхних клиновых частей. Для полуоткрытого паза (рис. 9.62, б)

$$\Delta \lambda_{\text{IIHAC}} = \frac{h_k}{b_w} \frac{c_{\vartheta 1}}{b_w + c_{\vartheta 1}} + \frac{h_k}{b_w + b_n} \frac{C_{\vartheta 1}}{b_w + b_n + c_{\vartheta 1}} \quad (9.268)$$

Для полузакрытого паза (рис. 9.62, в, г)

$$\Delta \lambda_{\text{IIHAC}} = \frac{h_w + 0,58 h_k}{b_w} \frac{c_{\vartheta 1}}{c_{\vartheta 1} + 1,5 b_w} \quad (9.269)$$

Для фазных и короткозамкнутых роторов дополнительное раскрытие рассчитывают по формуле

$$c_{\vartheta 2} = (t_2 - b_w)(1 - k_{\delta}). \quad (9.270)$$

Уменьшение коэффициента проводимости для открытых и полузакрытых пазов ротора (рис. 9.62, д—ж)

$$\Delta \lambda_{\text{IIHAC}} = \frac{h_w}{b_w} \frac{c_{\vartheta 2}}{b_w + c_{\vartheta 2}} \quad (9.271)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении λ_{IIHAC} определяют для статора по выражению

$$\lambda_{nI\text{HAC}} = \lambda_n - \Delta \lambda_{nI\text{HAC}}, \quad (9.272)$$

где $\lambda_{\text{п1}}$ — проводимость, рассчитанная без учета насыщения.

Для ротора

$$\lambda_{n2\text{нас}} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2\text{нас}}, \quad (9.273)$$

где $\lambda_{n2\xi}$ — проводимость пазового рассеяния ротора для ненасыщенной зубцовой зоны с учетом влияния вытеснения тока.

Коэффициенты проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора $\lambda_{\text{д1нас}}$ и ротора $\lambda_{\text{д2нас}}$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} k_{\delta} \\ \lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} k_{\delta} \end{array} \right\} \quad (9.274)$$

Значения k_{δ} принимают по кривым, представленным на рис. 9.61.

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения от полей рассеяния определяют по отношению сумм коэффициентов проводимости, рассчитанных без учета и с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x_{1\text{нас}} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1\text{нас}}}{\sum \lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{\text{п1нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}} \quad (9.275)$$

Для ротора принимают отношения сумм проводимостей, рассчитанных без учета влияния насыщения и действия эффекта вытеснения тока (для номинального режима) и с учетом этих факторов:

$$x'_{2\text{нас}} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\text{нас}}}{\sum \lambda_2} = x'_2 \frac{\lambda_{\text{п2нас}} + \lambda_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}} \quad (9.276)$$

Значения параметров $x_{1\text{нас}}$ и $x_{2\text{нас}}$ используют при расчете точек характеристик при скольжениях $s \geq s_{\text{кр}}$. Полученные для каждой из точек характеристики отношения токов, рассчитанных с учетом и без учета насыщения, сравнивают с принятыми коэффициентами $k_{\text{нас}}$. Если расхождение превышает 10...15 %, то расчет для этого значения s повторяют, внося соответствующую корректировку в первоначально принятый коэффициент $k_{\text{нас}}$.

Расчет пусковых характеристик. Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются начальным пусковым и максимальным моментами и начальным пусковым током. В двигателях с фазными роторами начальный момент и пусковой ток определяются сопротивлением пускового реостата. В двигателях с короткозамкнутыми роторами значения моментов и начального тока зависят от соотношений параметров. Кроме того, важным показателем пусковых свойств короткозамкнутого двигателя является значение минимального момента. Уменьшение момента в процессе разгона двигателя может произойти в связи с изменением соотношения параметров при уменьшении скольжения.

Стандарты на асинхронные двигатели устанавливают наименьшие допустимые относительные значения моментов и наибольшие относительные значения начальных пусковых токов для выпускаемых асинхронных машин в зависимости от их мощности, исполнения и числа пар полюсов. Для короткозамкнутых двигателей регламентируются значения всех перечисленных выше моментов и тока, а для двигателей с фазными роторами — только значения максимальных моментов, т. е. перегрузочная способность двигателей.

В табл. 9.31 приведены допустимые относительные значения моментов и начального пускового тока двигателей с короткозамкнутыми роторами серии 4А. Спроектированная заново асинхронная машина на базе серии 4А должна иметь пусковые характеристики, удовлетворяющие этим требованиям. В технических условиях или в заданиях на проектирование специальных асинхронных двигателей могут быть поставлены более жесткие требования к этим величинам.

В практике расчетов часто ограничиваются определением только двух точек характеристик: начального пускового и максимального моментов и начального пускового тока. Такой расчет дает лишь приближенные сведения о пусковых свойствах двигателя и может привести к

Таблица 9.31. Кратность начальных пусковых моментов $M_{\text{пп}}^*$ токов $I_{\text{пп}}^*$ асинхронных двигателей

Исполнение	2р	Высота оси вращения, мм					
		≤ 132		160-250		≥ 280	
		$M_{\text{пп}}^*$	$I_{\text{пп}}^*$	$M_{\text{пп}}^*$	$I_{\text{пп}}^*$	$M_{\text{пп}}^*$	$I_{\text{пп}}^*$
IP44	2	1,7-2	6,5-7,5	1,2-1,4	7-7,5	1-1,2	6,5-7
	4	2-2,2	5-7,5	1,2-1,4	6,5-7,5	1,2-1,3	5,5-7
	6	2-2,2	4-6,5	1,2-1,3	5-6,5	1,4	5,5-6,5
	8	1,6-1,9	4-5,5	1,2-1,4	5,5-6	1,2	5,5-6,5
	10	-	-	1,2	6	1	6
	12	-	-	-	-	1	6
IP23	2	-	-	1,2-1,3	7,0	1,2	6,5-7
	4	-	-	1,2-1,3	6,5	1,2	6,0-7
	6	-	-	1,2	6-7	1,2	6
	8	-	-	1,2-1,3	5,5-6,0	1,2	5,0-5,5
	10	-	-	-	-	1	5,5
	12	-	-	-	-	1	5,5

Примечание. Некоторые двигатели малой мощности с высотой оси вращения $h \leq 80$ мм выполняются с уменьшенной кратностью начального пускового тока.

погрешности при определении перегрузочной способности из-за неточности определения критического скольжения. Поэтому при проектировании целесообразно рассчитывать полные пусковые характеристики, т. е. зависимости $M^* = f(s)$ и $I^* = f(s)$ для всего диапазона изменения скольжения от $s = 1$ до значения, соответствующего режиму, близкому к номинальному.

Расчет пусковых характеристик затруднен необходимостью учета изменений параметров, вызванных эффектом вытеснения тока и насыщением от полей рассеяния, так как при больших скольжениях токи в обмотках статора и ротора короткозамкнутых двигателей могут превышать свое минимальное значение в 7-7,5 раза (см. табл. 9.31).

В то же время при больших токах увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмотки статора, что вызывает уменьшение ЭДС и снижение основного потока. Для учета этих факторов необходимо применение ЭВМ [6]. При ручном счете используют следующий упрощенный метод.

Учитывая, что индуктивное сопротивление взаимной индукции x_{12} с уменьшением насыщения магнитопровода увеличивается, в расчете пусковых характеристик для скольжений $s \geq 0,1 \dots 0,15$ оно может быть принято равным:

$$x_{12\pi} \approx x_{12} \frac{F_{\pi}}{F_{\delta}} = k_{\mu} x_{12} \quad (9.277)$$

Не внося большой погрешности, в расчетных формулах пусковых режимов пренебрегают сопротивлением r_{12} . Это оправдано при токах, заметно превышающих номинальный, так как электрические потери в обмотках, возрастающие пропорционально квадрату тока, многократно превышают потери в стали, для учета которых в схему смещения введен параметр r_{12} .

При этих допущениях коэффициент

$$c_{1\Pi} = 1 + x_1/x_{12\Pi} \quad (9.278)$$

и сопротивление правой ветви Г-образной схемы замещения (см. рис. 9.55)

$$Z_{\text{ВЕТВИ}} = c_{1\Pi} (R_n + j X_\Pi), \quad (9.279)$$

где для упрощения расчетных формул в отличие от обозначений в расчете рабочих характеристик принято

$$\left. \begin{array}{l} R_\Pi = r_1 + c_{1\Pi} r'_{2\xi} / s \\ X_\Pi = x_1 + c_{1\Pi} x'_{2\xi} \end{array} \right\} \quad (9.280)$$

Ток в обмотке ротора

$$I'_2 = c_{1\Pi} I'_2 = \frac{U_{1HOM} c_{1\Pi}}{|Z_{\text{ВЕТВИ}}|} = \frac{U_{1HOM}}{\sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2}} \quad (9.281)$$

Сопротивление всей схемы замещения для пусковых режимов

$$Z_{cx} = \frac{c_{1\Pi} (R_\Pi + j X_\Pi) j x_{12\Pi} c_{1\Pi}}{R_\Pi + j (X_\Pi + x_{12\Pi})} \quad (9.282)$$

Из (9.279) — (9.282)

$$I_{1\Pi} = \frac{U_{1HOM}}{|Z_{cx}|} = I'_{2\Pi} \frac{\sqrt{R_\Pi^2 + (X_\Pi + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} x_{12\Pi}} \quad (9.283)$$

Характеризующие пусковые данные машины кратность тока и момента при заданном s

$$\left. \begin{array}{l} I_{1*} = I_{1\Pi} / I_{1HOM} \\ M_* = \left(\frac{I_{2r}}{I_{2HOM}} \right)^2 K_R \frac{s_{HOM}}{s} \end{array} \right\} \quad (9.284)$$

Полученные выражения (9.281) — (9.284) дают возможность рассчитать токи и моменты во всем диапазоне изменения скольжения от $s = 1$ до $s = 0,1$.

Расчет рекомендуется проводить в последовательности, определенной в формуляре (табл. 9.32) для пяти-шести точек характеристик в указанном диапазоне изменения скольжения.

Таблица 9.32. Формуляр расчета пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$$\begin{aligned} P_{2\text{ном}} &= \dots \text{ кВт}; U_{1\text{ном}} = \dots \text{ В}; 2p = \dots; I_{1\text{ном}} = \dots \text{ А}; \\ I'_{2\text{ном}} &= \dots \text{ А}; x_1 = \dots \text{ Ом}; x'_2 = \dots \text{ Ом}; x_{12\pi} = \dots \text{ Ом}; \\ c_{1\pi} &= \dots; r_1 = \dots \text{ Ом}; r'_2 = \dots \text{ Ом}; s_{\text{ном}} = \dots \end{aligned}$$

№ п/п	Расчетная формула	Единица величины	Скольжение s	
			1	0,8..... $s = s_{\text{кр}}$
1	$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_n} \frac{f_2}{p_{cv}} 10^{-7}}$	—		
2	$\varphi = \varphi(\xi)$	—		
3	$h_r = h_c / (1 + \varphi)$	ММ		
4	$k_r = q_c / q_r$	—		
5	$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r'_2} (k_r - 1)$	—		
6	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом		
7	$k_\delta = \varphi'(\xi)$	—		
8	$\lambda_{\pi 2\xi} = \lambda_{\pi 2} - \Delta \lambda_{\pi 2\xi}$	—		
9	$K_x = \sum \lambda_{2\xi} / \sum \lambda_2$	—		
10	$x'_{2\xi} = K_x x'_2$	Ом		
11	$R_\pi = r_1 + c_{1\pi} \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом		
12	$X_\pi = x_1 + c_{1\pi} x'_{2\xi}$	—		
13	$I'_2 = U_{\text{ном}} / \sqrt{R_\pi^2 + X_\pi^2}$	—		
14	$I_{1\pi} = I'_2 \sqrt{R_\pi^2 + (X_\pi + x_{12\pi})^2} / (c_{1\pi} x_{12\pi})$	А		
15	$I^* = I_1 / I_{1\text{ном}}$	—		
16	$M^* = \left(\frac{I'_2}{I'_{2\text{ном}}} \right) K_R \frac{s_{\text{ном}}}{s}$	—		

Для двигателей, полный ток паза которых $I_{1\text{паза}} = I_1 u_{\text{п}} / a$ в пусковых режимах превышает 400 А, необходимо учесть влияние насыщения от полей рассеяния на пусковые характеристики. Для этого в расчетах используют уменьшенные в результате насыщения значения сопротивлений обмоток $x_{1\text{нас}}$ и $x'_{2\xi\text{нас}}$ а также коэффициента

$$c_{In\text{.нас}} = 1 + X_{In\text{.нас}} / x_{12n}. \quad (9.285)$$

Степень влияния поля рассеяния на x_1 и $x'_{2\xi}$ зависит от токов в обмотках, но, в свою очередь, от этих сопротивлений существенно зависят токи статора и ротора. Поэтому прямой расчет $x_{1\text{нас}}$ и $x'_{2\xi\text{нас}}$ до получений пусковых характеристик невозможен. Значения $x_{1\text{нас}}$ и $x'_{2\xi\text{нас}}$ находят для каждого из назначенных скольжений методом последовательных приближений. Как известно, объем расчета этим методом зависит от правильного первоначального задания искомой величины. Для данного расчета хорошие результаты дает следующий практический метод задания токов.

Первоначально рассчитывают пусковые токи при $s = 1$ для значений x_1 , $x'_{2\xi}$ и $c_{1\text{п}}$, полученных без учета насыщения (см. табл. 9.32). Далее задаются коэффициентом увеличения тока от насыщения зубцовой зоны полями рассеяния $k_{\text{нас}}$. Ориентировочно для двигателей, полный ток паза которых в пусковом режиме превышает 2000...2500 А, можно принять $k_{\text{нас}} = 1,4...1,5$; при полном токе паза, близком к 1000 А, $k_{\text{нас}} = 1,15...1,2$. Напомним, что полный ток паза $I_{1\text{паза}} = I_1 u_{\text{п}} / a$ рассчитывается в данном случае по току статора, полученному в расчете без учета влияния насыщения для скольжения $s = 1$ (табл. 9.32).

Далее по (9.275), (9.276) и (9.285) рассчитывают $x_{1\text{нас}}$, $x'_{2\xi\text{нас}}$ и $c_{1\text{п нас}}$ и повторяют расчет токов, вводя полученные значения в расчетные формулы. Если расхождение полученного $k'_{\text{нас}}$ и принятого первоначально $k_{\text{нас}}$ не превышает 10...15 %, то расчет для $s = 1$ считают законченным. При больших расхождениях корректируют первоначальное задание $k_{\text{нас}}$ и повторяют расчет.

Для уменьшения объема расчета других точек характеристик поступают следующим образом.

Учитывая, что обычно насыщение зубцов полями рассеяния не сказывается на параметрах при токах $I_1 < (1,5...2)/I_{\text{ном}}$, принимают, что при скольжениях, близких к $s = 0,1...0,15$, изменение x_1 и $x'_{2\xi}$ не происходит и $k_{\text{нас}} = 1$. Далее, для каждого из назначенных больших скольжений задаются первоначальными значениями $k_{\text{нас}}$, исходя приближенно из линейного его изменения от $k_{\text{нас}} = 1$ при $s = 0,1...0,15$ до $k_{\text{нас}}$ при $s = 1$.

Такой метод задания первоначальных значений $k_{\text{нас}}$ позволяет правильно учесть влияние насыщения уже после первой или второй итерации.

Расчетные формулы для определения пусковых характеристик с учетом влияния насыщения полями рассеяния сведены в формуляр (табл. 9.33).

Расчет величины C_N по (9.265) предлагается выполнить до начала расчета характеристик, так как она остается постоянной при изменении скольжения.

Максимальный момент двигателя вначале определяют по приближенному значению критического скольжения:

$$S_{KP} \approx -\frac{\overline{r}_2}{x'_1 / C_{1\text{п}} + x'_2}$$

После расчета всей пусковой характеристики значения $s_{\text{кр}}$ и M_{max}^* уточняют.

Таблица 9.33. Формуляр расчета пусковых характеристик асинхронного двигателя с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

$P_2 = \dots$ кВт; $U_1 = \dots$ В; $2p = \dots$; $I_{1\text{ном}} = \dots$ А; $I'_{2\text{ном}} = \dots$ А;
 $x_1 = \dots$ Ом; $x'_2 = \dots$ Ом; $r_1 = \dots$ Ом; $r'_2 = \dots$ Ом;
 $x_{12\Pi} = \dots$ Ом; $s_{\text{ном}} = \dots$; $C_N = \dots$

№ п/п	Расчетная формула	Едини- цы величины	Скольжение s			
			1	0,8	...	$s = s_{\text{кр}}$
1	k_{HAC}	—				
2	$F_{\Pi,CP} = 0,7 \frac{I_{1\Pi} k_{HAC} u_{\Pi}}{a} (k'_\beta + k_{y1} k_{o61} \frac{Z_1}{Z_2})$	A				
3	$B_{\phi\delta} = F_{\Pi,CP} 10^{-6} / (1,6\delta C_N)$	Tл				
4	$k_\delta = f(B_{\phi\delta})$	—				
5	$c_{\vartheta 1} = (t_{z1} - b_{w1})(1 - k_\delta)$	ММ				
6	$\lambda_{\Pi HAC} = \lambda_{\Pi 1} - \Delta \lambda_{\Pi HAC}$	—				
7	$\lambda_{\Delta 1 HAC} = k_\delta \lambda_{\Delta 1}$	—				
8	$X_{1HAC} = x_1 \sum \lambda_{1HAC} / \sum \lambda_1$	Ом				
9	$C_{1\Pi} = 1 + x_{1HAC} / x_{12\Pi}$	—				
10	$c_{\vartheta 2} = (t_{z2} - b_{w2})(1 - k_\delta)$	ММ				
11	$\lambda_{\Pi 2 HAC} = \lambda_{\Pi 2\xi} - \Delta \lambda_{\Pi 2 HAC}$	—				
12	$\lambda_{\Delta 2 HAC} = k_\delta \lambda_{\Delta 2}$	—				
13	$X'_{2\xi HAC} = x_2' \sum \lambda_{2\xi HAC} / \sum \lambda_2$	Ом				
14	$R_{\Pi, HAC} = r_1 + c_{1\Pi, HAC} x'_{2\xi HAC}$	Ом				
15	$X_{\Pi, HAC} = x_{1HAC} + c_{1\Pi, HAC} x'_{2\xi HAC}$	Ом				
16	$I'_{2HAC} = U_{1\text{ном}} / \sqrt{R_{\Pi, HAC}^2 + X_{\Pi, HAC}^2}$	A				
17	$I_{1HAC} = I'_{2HAC} \frac{\sqrt{R_{\Pi, HAC}^2 + (X_{\Pi, HAC} + X_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi, HAC} x_{12\Pi}}$	A				
18	$k'_{HAC} = I_{1HAC} / I_{1\Pi}$	—				
19	$I_{1*} = I_{1HAC} / I_{1\text{ном}}$	—				
20	$M_* = (\frac{I'_{2HAC}}{I'_{2\text{ном}}})^2 K_R \frac{s_{\text{ном}}}{s}$	—				

Примечания: 1. Полученное в п. 18 значение k'_{HAC} сравнить с принятым $k_{\text{нac}}$ (п. 1); при расхождении более 10—15% скорректировать значение $k_{\text{нac}}$ и повторить расчет для данного скольжения.

2. Ток I_1 (п. 2 и 18) принимается из данных расчета табл. 9.32 (п. 14) для соответствующего скольжения: $s = 1 \div s_{\text{кр}}$.

3. Ток $I'_{2\text{ном}}$ (п. 20) берется из данных расчета рабочих характеристик двигателя (см. табл. 9.30) для $s = s_{\text{ном}}$.

9.14. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РОТОРАМИ, ИМЕЮЩИМИ ДВОЙНУЮ БЕЛИЧЬЮ КЛЕТКУ ИЛИ ФИГУРНЫЕ ПАЗЫ

Необходимость обеспечения высоких пусковых моментов для нормальной работы ряда приводов привела к довольно широкому распространению асинхронных двигателей с роторами, имеющими двойную беличью клетку со вставными стержнями или фигурными пазами, залитыми алюминием. В последние годы получили распространение также двухклеточные роторы с литыми обмотками. Конфигурация и размеры пазов с литыми обмотками не связаны какими-либо ограничениями, налагаемыми сортаментами профильной меди или латуни, поэтому они могут быть выполнены более рационально с точки зрения использования зубцовой зоны ротора и обеспечения высоких пусковых характеристик по сравнению со сварными клетками.

Расчет магнитной цепи двигателей с фигурными стержнями или двойной клеткой на роторе не отличается от расчета обычных асинхронных машин. Некоторая особенность расчета магнитного напряжения зубцовой зоны ротора учтена в расчетных формулах, приведенных в § 9.9.

Здесь и далее фигурный стержень литой обмотки ротора будем рассматривать как двойную клетку ротора, причем к пусковой клетке отнесем верхнюю (прямоугольную или полуовальную — в зависимости от формы фигурного паза) часть стержня, а к рабочей клетке — его нижнюю часть.

Расчет параметров двухклеточного ротора встречает существенные затруднения, так как распределение токов между стержнями верхней и нижней клеток определяется как соотношением их активных сопротивлений, так и частотой тока в роторе. В то же время при больших скольжениях распределение плотности токов в пределах сечений каждого из стержней также неравномерно из-за действия эффекта вытеснения тока.

При расчете параметров двухклеточных роторов применяют приближенные методы, позволяющие получить общее выражение для активного и индуктивного сопротивлений обеих обмоток ротора r_2 и x_2 с учетом распределения токов между стержнями верхней и нижней клеток в зависимости от скольжения ротора. Это дает возможность проводить расчет рабочих и пусковых характеристик двигателей по формулам, применяемым для расчета характеристик машин с одноклеточными роторами.

Рассмотрим один из таких приближенных практических методов расчета параметров двухклеточного ротора.

Схема замещения фазы двухклеточного ротора представлена на рис. 9.63. Как видно, сопротивления рабочей и пусковой клеток включены параллельно. Ветвь а—б—в содержит

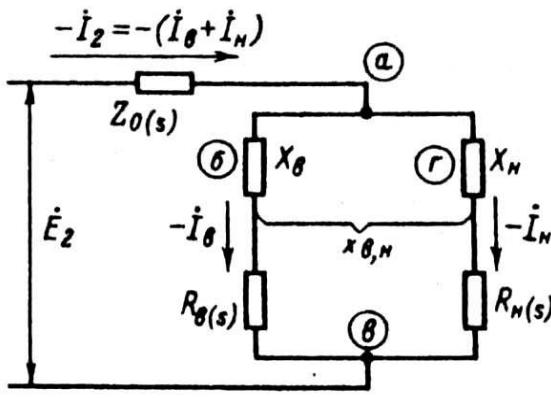


Рис. 9.63. Схема замещения фазы короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой

сопротивление верхней (пусковой) клетки, ветвь а—г—в сопротивления нижней (рабочей) клетки [6].

Схеме замещения соответствует система уравнений

$$\dot{I}_B(R_{B(S)} + jX_B) + \dot{I}_H j x_{B,H} + (\dot{I}_B + \dot{I}_H)Z_{0(S)} = \dot{E}_2; \quad (9.287)$$

$$\dot{I}_B(R_{B(S)} + jX_B) + \dot{I}_H j x_{B,H} + (\dot{I}_B + \dot{I}_H)Z_{0(S)} = \dot{E}_2;$$

В этих уравнениях и на схеме замещения \dot{I}_H , \dot{I}_B — токи в стержнях верхней и нижней клеток; $R_{B(S)}$ и $R_{H(S)}$ — активные, а X_B и X_H — индуктивные сопротивления соответственно верхней и нижней клеток; $x_{H,B} = x_{B,H}$ — сопротивление взаимной индукции между стержнями верхней и нижней клеток; $Z_{0(S)}$ — общее для обеих параллельных ветвей сопротивление.

Анализируя картину поля потока рассеяния в пазу двухклеточного ротора (рис. 9.64), видим, что часть потока пазового рассеяния Φ_{612} сцеплена только со стержнем нижней клетки (участок паза 1-2), Оставшаяся часть потока Φ_{623} , магнитные линии которого проходят через паз выше нижнего стержня (участок паза 2-3), сцеплена со стержнями и верхней, и нижней клеток. Поэтому индуктивное сопротивление стержня нижней клетки определяется проводимостью всего потока рассеяния паза, а сопротивление индуктивности верхнего стержня и взаимная индуктивность верхнего и нижнего стержней определяются проводимостью потока Φ_{623} , так как только эта часть потока сцеплена одновременно и с верхним, и с нижним стержнями.

Исходя из этого, примем следующие обозначения: $x_{p,v}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня верхней клетки, определяемое проводимостью верхней части паза $\lambda_{p,v}$ с учетом потокосцепления с верхним стержнем (поток Φ_{623} создается МДС и верхнего, и нижнего стержней); $(x_H + x_B)$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня нижней клетки, причем x_H определяется проводимостью потоку рассеяния Φ_{612} нижней части паза с учетом изменяющегося по высоте паза потокосцепления с нижним стержнем, а x_B — проводимостью потоку рассеяния Φ_{623} верхней части паза. Потокосцепление потока Φ_{623} с нижним стержнем постоянно.

Кроме того, учтем, что сопротивление взаимной индукции $x_{B,H} = x_{H,B}$ определяется также проводимостью верхней части паза потоку Φ_{623} .

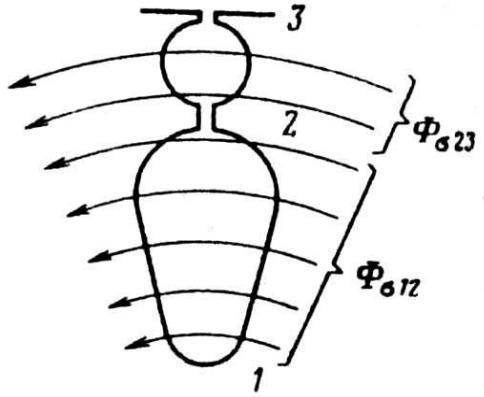


Рис. 9.64. Поток рассеяния в пазу двухклеточного ротора

Детальный анализ потоков рассеяния и математическое выражение коэффициентов магнитной проводимости, определяющих указанные выше сопротивления, показывают, что для принятых в электромашиностроении конфигураций и размерных соотношений пазов верхней и нижней клеток без большой погрешности в уравнениях (9.287) можно принять $X_B \approx x_{B,B} \approx x_{B,H}$, так как эти сопротивления обусловлены проводимостью верхней части паза и

$$X_H = x_{B,H} + x_H.$$

При принятом допущении система уравнений (9.287) может быть записана следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (I_B + I_H)Z_{0(S)} + (I_B + I_H)jx_B + I_B R_{B(S)} &= E_2 \\ (I_B + I_H)Z_{0(S)} + (I_B + I_H)jx_B + I_H(R_{H(S)} + jx_H) &= E_2 \end{aligned} \right\} \quad (9.288)$$

Системе уравнений (9.288) соответствует схема замещения, приведенная на рис. (9.288), которая может служить исходной для определения параметров двухклеточного ротора. Практические формулы для расчета r_2 и x_2 роторов с общими и раздельными замыкающими кольцами несколько отличаются.

Рассмотрим вначале метод расчета r_2 и x_2 роторов с общими замыкающими кольцами. Для таких роторов коэффициенты при неизвестных токах в уравнениях (9.288) обозначают следующие сопротивления: $R_{B(S)} + r_B / s$ — активное сопротивление стержня верхней клетки; $R_{H(S)} = r_H / s$ — активное сопротивление стержня нижней клетки; $x_B = x_{B,B}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня верхней клетки; $x_H = x_{B,H}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня нижней клетки;

$$Z_{0(S)} = Z_{kl(s)} + jx_d$$

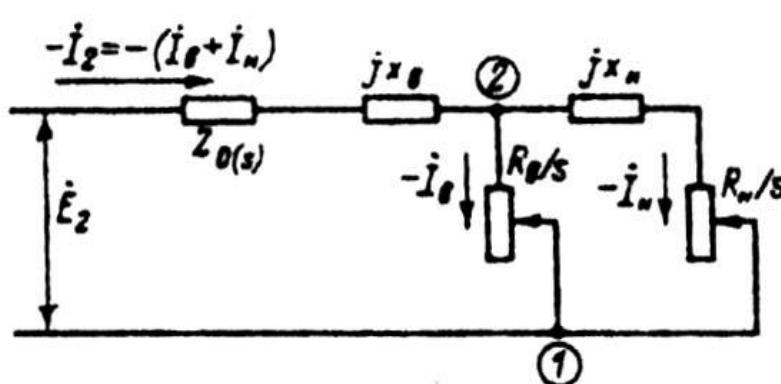


Рис. 9.65. Преобразованная схема замещения фазы короткозамкнутого ротора с двойной беличьей клеткой

где $Z_{kl(S)}$ — сопротивление участков замыкающих колец между двумя соседними пазами, приведенное к току ротора (см. § 9.10); x_d — индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния обмотки ротора.

Эквивалентное сопротивление разветвленной цепи этой схемы между токами 1—2

$$Z_{\vartheta(s)} = \frac{\mathbf{r}_B/s(\mathbf{r}_H/s + j\chi_{\pi.H})}{\mathbf{r}_B/s + \mathbf{r}_H/s + j\chi_{\pi.H}} = \frac{1}{s} \frac{\alpha \mathbf{r}_H + j\mathbf{r}_B \beta s}{1 + j\beta s} \quad (9.289)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\mathbf{r}_B/s}{\mathbf{r}_B/s + \mathbf{r}_H/s} = \frac{\mathbf{r}_B}{\mathbf{r}_B + \mathbf{r}_H} \\ \beta &= \frac{\chi_{\pi.H}}{\mathbf{r}_B + \mathbf{r}_H} \end{aligned} \right\} \quad (9.290)$$

Представим $Z_{\vartheta(s)}$ в виде суммы активного r_{ϑ} и индуктивного x_{ϑ} сопротивлений:

$$Z_{\vartheta(s)} = r_{\vartheta} \frac{1}{s} + jx_{\vartheta} = \frac{1}{s} \frac{\alpha \mathbf{r}_H + \mathbf{r}_B \beta^2 s^2}{1 + \beta^2 s^2} + j\beta \frac{\mathbf{r}_B - \alpha \mathbf{r}_H}{1 + \beta^2 s^2}$$

и упростим выражение для r_{ϑ} и x_{ϑ}

$$\left. \begin{aligned} r_{\vartheta} &= r_B \left(1 - \frac{\alpha}{1 + \beta^2 s^2} \right) \\ x_{\vartheta} &= x_{\pi.H} \frac{\alpha^2}{1 + \beta^2 s^2} \end{aligned} \right\} \quad (9.291)$$

Сопротивления r_{ϑ} и x_{ϑ} зависят от скольжения, так как изменение соотношения активных и индуктивных сопротивлений стержней, вызванное изменением частоты тока в роторе, изменяет соотношение токов в стержнях рабочей и пусковой клеток.

При скольжениях $s \ll 1$, соответствующих холостому ходу и номинальному режиму двигателей, из (9.291) получим

$$\left. \begin{aligned} r_{\vartheta,xx} &= r_B (1 - \alpha) \\ x_{\vartheta,xx} &= x_{\pi.H} \alpha^2 \end{aligned} \right\} \quad (9.292)$$

Коэффициенты изменения эквивалентных сопротивлений r_{ϑ} и x_{ϑ} в зависимости от скольжения

$$k'_x = \frac{x_{\vartheta}}{x_{\vartheta,xx}} = \frac{1}{1 + \beta^2 s^2}; \quad (9.293)$$

$$k'_r = \frac{r_{\vartheta}}{r_{\vartheta,xx}} = \frac{1}{1 - \alpha} \left(1 - \frac{\alpha}{1 + \beta^2 s^2} \right) = \frac{1}{1 - \alpha} (1 - \alpha k'_x) \quad (9.294)$$

На основании полученных соотношений и с учетом материала § 9.13 запишем основные расчетные формулы для определения r_2 и x_2 двухклеточных роторов с общими замыкающими кольцами (двуихклеточные роторы с литыми обмотками и роторы с фигурными пазами).

При $s_0 < s \leq s_h$ активное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_2 = r_{\text{э.х.х}} + r_0 = r_e(1 - \alpha) + \frac{2r_{\text{кл}}}{\Delta^2} \quad (9.295)$$

где α — по (9.290), причем

$$\left. \begin{aligned} r_B &= \rho_{BV} \frac{l_B}{q_B} \\ r_H &= \rho_{HV} \frac{l_H}{q_H} \end{aligned} \right\} \quad (9.296)$$

ρ_{BV} , ρ_{HV} , l_V , l_H , q_B , q_H — удельные сопротивления при расчетной температуре, длины и площади поперечных сечений стержней верхней и нижней клеток; при литых обмотках с общими замыкающими кольцами в $\rho_{BV} = \rho_{HV}$ и $l_V = l_H$; Δ — см. (9.70).

Индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$x_2 = x_{n.e} + x_0 + x_{\text{э.х.х}}, \quad (9.297)$$

где

$$\left. \begin{aligned} x_{n.B} &= 7,9 f_1 l'_\delta \lambda_{n.B} \cdot 10^{-6} \\ x_0 &= 7,9 f_1 l'_\delta (\lambda_{d2} + \lambda_{kl2}) \cdot 10^{-6} \\ x_{\text{э.х.х}} &= x_{n.H} \alpha^2 = 7,9 f_1 l'_\delta \lambda_{n.H} \alpha^2 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right\} \quad (9.298)$$

С учетом (9.298)

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_\delta (\lambda_{n.e} + \lambda_{n.H} \alpha^2 + \lambda_{d2} + \lambda_{kl2}) 10^{-6}, \quad (9.299)$$

где $\lambda_{n.B}$ и $\lambda_{n.H}$ — коэффициенты магнитных проводимостей пазового рассеяния соответственно верхней и нижней клеток, которые определяются в зависимости от конфигурации пазов верхней и нижней клеток по формулам табл. 9.34; λ_{d2} — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора, который определяется по (9.180); $\lambda_{kl2} = \lambda_{kl2}$ — коэффициент магнитной проводимости участков замыкающего кольца, приведенный к току ротора, который определяется по (9.178) или по (9.179).

Для пусковых режимов ($s \geq s_h$) $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ роторов с общими замыкающими кольцами рассчитывают по следующим формулам.

Активное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_{2\xi} = r_e(1 - \alpha) k'_r + \frac{2r_{KL}}{\Delta^2} = r_e (1 - \alpha k'_x) + \frac{2r_{KL}}{\Delta} \quad (9.300)$$

Таблица 9.34. Расчетные формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния двухклеточных роторов и роторов с фигурными пазами

Рисунок	Расчетные формулы	
	$\lambda_{\text{П.В}}$	$\lambda_{\text{П.Н}}$
9.66, а	$\left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2b_B}\right)k_{\text{д.в}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$	$\left(0,785 - \frac{b_0}{2b_H}\right)k_{\text{д.в}} + \frac{h_0}{b_0}$
9.66, б	$\left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2b_B}\right)k_{\text{д.в}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$	$\frac{h_H}{3b_H}k_{\text{д.н}} + \frac{h_0}{b_0}$
9.66, в	$\left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2b_B}\right)k_{\text{д.в}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$	$\left[\frac{h'_H}{3b_H} \left(1 - \frac{\pi b_H^2}{8q_H}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b_H}\right]k_{\text{д.н}} + \frac{h_0}{b_0}$
9.66, г	$\left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2b_B}\right)k_{\text{д.в}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$	$\left[\frac{h'_H}{3b_H} \left(1 - \frac{\pi b_H^2}{8q_H}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b_H}\right]k_{\text{д.н}} + \frac{h_0}{b_0}$
9.66, д	$\frac{h_B}{2b_B}k_{\text{д.в}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$	$\left(0,785 - \frac{b_B}{2b_H}\right)k_{\text{д.в}}$
9.66, е	$\left(\frac{h'_B}{2b_B} + \frac{3h'_B}{b+2b_{ш}}\right)k_{\text{д.в}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$	$\left[\frac{h'_H}{3b_H} \left(1 - \frac{\pi b_H^2}{8q_H}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_B}{2b_H}\right]k_{\text{д.н}}$

Примечания: 1. При закрытых пазах ротора коэффициент магнитной проводимости шлица $h_{ш}/b_{ш}$ рассчитывать в соответствии с указаниями, приведенными в § 9.10 (см. рис. 9.52).
2. При расчете параметров холостого хода и номинального режима принимать $k_{\text{д.в}} = k_{\text{д.н}} = 1$.

Индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$x_{2\xi} = 7,9 f_1 l'_\delta (\lambda_{n.e} + \lambda_{n.H} \alpha^2 k'_x + \lambda_{KL2} + \lambda_o) 10^{-6}$$

В этих формулах k'_x и k'_r рассчитывают по (9.293) и (9.294), в которых α и β определяют по (9.290), а $\lambda_{\text{п.в}}$ и $\lambda_{\text{п.н}}$. Для пазов, показанных на рис. 9.66, — по формулам табл. 9.34.

Предполагают, что плотность тока в пределах сечения каждого из стержней постоянна. При $\xi_B > 1$ и $\xi_H > 1$ можно несколько повысить точность расчета, учитывая влияние эффекта вытеснения тока на сопротивления каждого из стержней. Для этого по формулам, приведенным

в § 9.13, последовательно рассчитывают для верхнего стержня $\xi_{\text{в}}$, $k_{\text{тв}}$, $r_{B\xi}$, $k_{\text{д.в}}$, $x_{B\xi}$ и для нижнего стержня $\xi_{\text{н}}$, $k_{\text{тн}}$, $r_{H\xi}$, $k_{\text{д.н}}$, $x_{H\xi}$, после чего определяют

$$\alpha_{\xi} = \frac{r_{B\xi}}{r_{B\xi} + r_{H\xi}} \quad \beta_{\xi} = \frac{x_{H\xi}}{r_{B\xi} + r_{H\xi}} \quad (9.302)$$

подставляя эти величины вместо α и β последующие формулы, находят $k'_{x\xi}$ и $k'_{r\xi}$ и по (9.300) и (9.301) рассчитывают $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ с учетом влияния эффекта вытеснения тока на сопротивление каждого из стержней обмотки при принятых значениях s . Обычно $k_{\text{тв}}$ и $k_{\text{тн}}$ близки к единице, и уточнения расчета, связанного с влиянием эффекта вытеснения тока на каждый из стержней, не требуется.

Для уточнения расчета пускового момента и тока следует учесть также влияние насыщения от полей рассеяния на проводимость паза верхней клетки. Расчет проводят аналогично изложенному в § 9.13.

При расчете сопротивлений роторов с раздельными замыкающими кольцами (двухклеточные роторы с обмоткой из вставных стержней) аналогично принятому ранее допущению ($x_{\text{в.н}} = x_{\text{п.в}}$) принимают, что индуктивное сопротивление участков замыкающего кольца верхней клетки приблизительно равно сопротивлению и взаимоиндуктивности участков колец верхней и нижней клеток. Такое допущение позволяет использовать ту же схему замещения (см. рис. 9.65), но с несколько измененными значениями ее параметров. В схеме замещения ротора с раздельными кольцами:

сумма активных сопротивлений стержня и участков замыкающих колец верхней клетки

$$R_{\text{в}} = r_{\text{в}} + \frac{2r_{\text{кл.в}}}{\Delta^2} \quad (9.303)$$

сумма активных сопротивлений стержня и участков замыкающих колец нижней клетки

$$R_{\text{н}} = r_{\text{н}} + \frac{2r_{\text{кл.н}}}{\Delta^2} \quad (9.304)$$

сумма индуктивных сопротивлений пазового рассеяния и участков замыкающих колец верхней клетки

$$x_{\text{в}} = x_{n.\text{в}} + x_{\text{кл.в}} = 7,9 f_1 l'_{\delta} (\lambda_{n.\text{в}} + \lambda_{\text{кл.в}}) 10^{-6}; \quad (9.305)$$

сумма индуктивных сопротивлений пазового рассеяния и участков замыкающих колец нижней клетки

$$x_{\text{н}} = x_{n.\text{н}} + x_{\text{кл.н}} = 7,9 f_1 l'_{\delta} (\lambda_{n.\text{н}} + \lambda_{\text{кл.н}}) 10^{-6}. \quad (9.306)$$

В этих выражениях $\lambda_{n.\text{в}}$ и $\lambda_{n.\text{н}}$ — коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеяния соответственно верхней и нижней клеток (рассчитываются в зависимости от конфигурации пазов по данным табл. 9.33); $\lambda_{\text{кл.в}}$, $\lambda_{\text{кл.н}}$ — коэффициенты магнитной проводимости участков замыкающих колец [рассчитываются по (9.178) или (9.179)].

Общее сопротивление для обеих параллельных ветвей схемы замещения

$$z_0 = x_0 = x_{\text{в}} = 7,9 f_1 l'_{\delta} \lambda_{\text{д}} 10^{-6}, \quad (9.307)$$

где λ_d — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния, рассчитываемый по (9.180).

Сопротивления r_2 и x_2 роторов с раздельными замыкающими кольцами для холостого хода и номинального режима работы, Ом,

$$r_2 = r_{\vartheta,x,x} = R_e (1 - \alpha); \quad (9.308)$$

$$x_2 = x_\vartheta + x_{\vartheta,x,x} + x_0 = 7,9 f_l l'_\delta (\lambda_{n,e} + \lambda_{n,h} \alpha^2 + \lambda_{k,l,e} + \lambda_\partial) 10^{-6}, \quad (9.309)$$

где

$$\alpha = \frac{R_B}{R_H + R_B}$$

Сопротивления $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$, для пусковых режимов работы ($s \gg s_h$), Ом,

$$r_{2\xi} = r_\vartheta = R_e (1 - \alpha k'_x); \quad (9.310)$$

$$x_{2\xi} = 7,9 f_l l'_\delta (\lambda_{n,e} + \lambda_{n,h} \alpha^2 k'_x + \lambda_{k,l,e} + \lambda_\partial) 10^{-6}, \quad (9.311)$$

где k'_x определяется по (9.293) при

$$\beta = X_h / (R_e + R_h). \quad (9.312)$$

Эффект вытеснения тока в каждом из стержней и влияние насыщения полями рассеяния на параметры ротора учитывают так же, как и для роторов с общими замыкающими кольцами.

Приведенный метод расчета параметров двухклеточных роторов и роторов с фигурными пазами, как и другие аналогичные ему методы, учитывающие индуктивную связь только между полными токами каждого из стержней, являются приближенными, однако они находят применение в расчетной практике благодаря своей простоте. Более точный метод расчета параметров ротора с произвольной конфигурацией стержней рассматривается в спецкурсах [7].

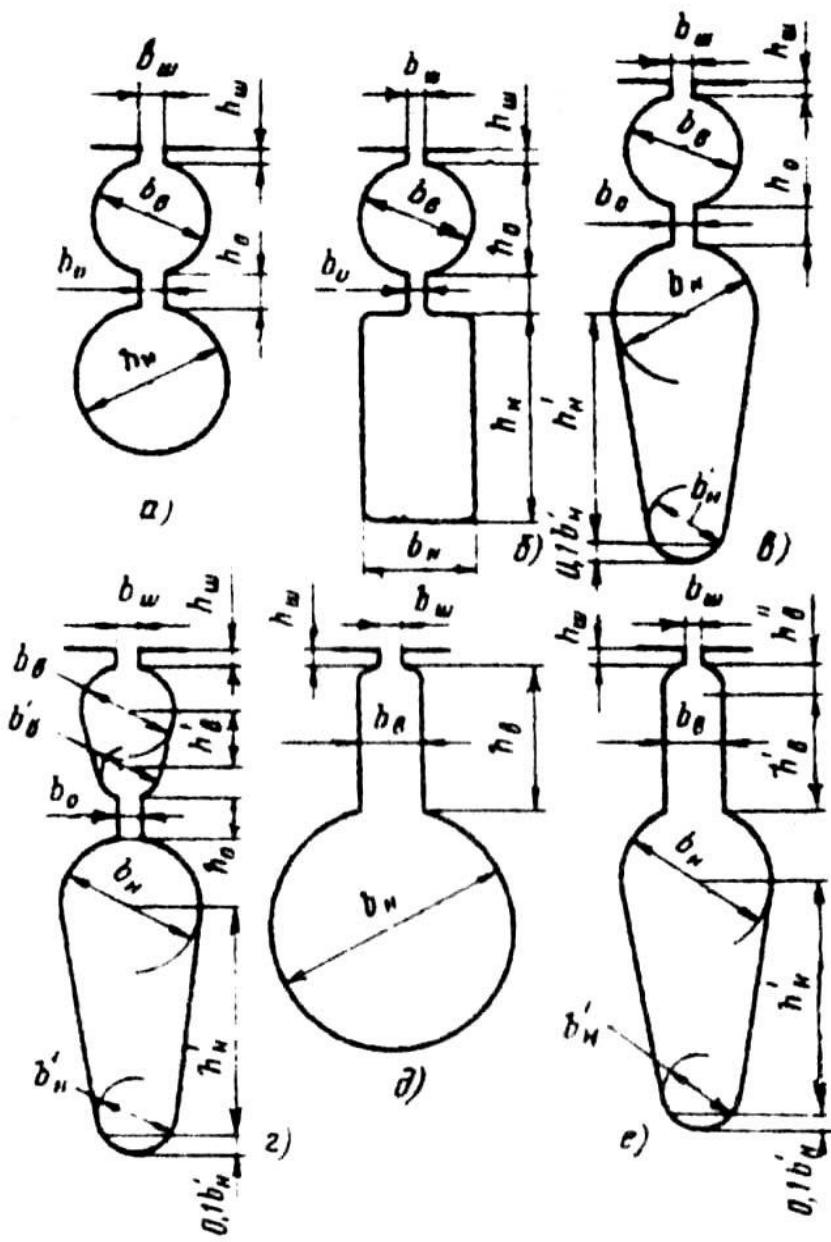


Рис. 9.66. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния двухклеточных короткозамкнутых роторов с двойной беличьей клеткой и с фигурными пазами:
 а—г — пазы роторов с двойной беличьей клеткой;
 д, е — фигурные пазы

9.15. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На первоначальной стадии проектирования достаточно достоверную оценку теплового режима двигателя дает приближенный метод теплового расчета, основанный на упрощенном представлении о характере тепловых связей между элементами электрической машины. В нем используют средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности и теплопроводности

изоляции, характерные для определенной конструкции и технологии производства двигателей данного типа.

Для расчета нагрева асинхронных машин, спроектированных на базе серий 4А и АИ, берутся усредненные коэффициенты теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции в пазовой и лобовой частях обмоток.

Расчет нагрева проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима, но потери в изолированных обмотках статора и фазного ротора несколько увеличивают по сравнению с расчетными, предполагая, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры: при классе нагревостойкости изоляции В — до 120° С, при классе нагревостойкости изоляции F — до 140° С и при классе нагревостойкости изоляции H — до 165° С. При этом коэффициент увеличения потерь k_p по сравнению с полученными для расчетной температуры составит для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В $k_p = p_{120}/p_{75} = 1,15$, для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости F $k_p = p_{140}/p_{115} = 1,07$, для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости H $k_p = p_{165}/p_{115} = 1,45$.

Электрические потери в обмотке статора делятся на потери в пазовой части $P'_{\vartheta,п}$, и потери в лобовых частях катушек $P'_{\vartheta,л1}$:

$$P'_{\vartheta,n} = k_p P_{\vartheta,l} \frac{2l_1}{l_{CP1}}; \quad (9.313)$$

$$P'_{\vartheta,л1} = k_p P_{\vartheta,l} \frac{2l_1}{l_{CP1}} \quad (9.314)$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta v_{noe1} = K \frac{P'_{\vartheta,п1} + P_{ст.осн}}{\pi D l_1 \alpha_1} \quad (9.315)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи с поверхности, определяемый по рис. 9.67 и 9.68 в зависимости от исполнения машины; К — коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду (принимают по табл. 9.35).

Таблица 9.35 Средние значения коэффициента К

Исполнение двигателя по способу защиты	Число полюсов двигателя 2p					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

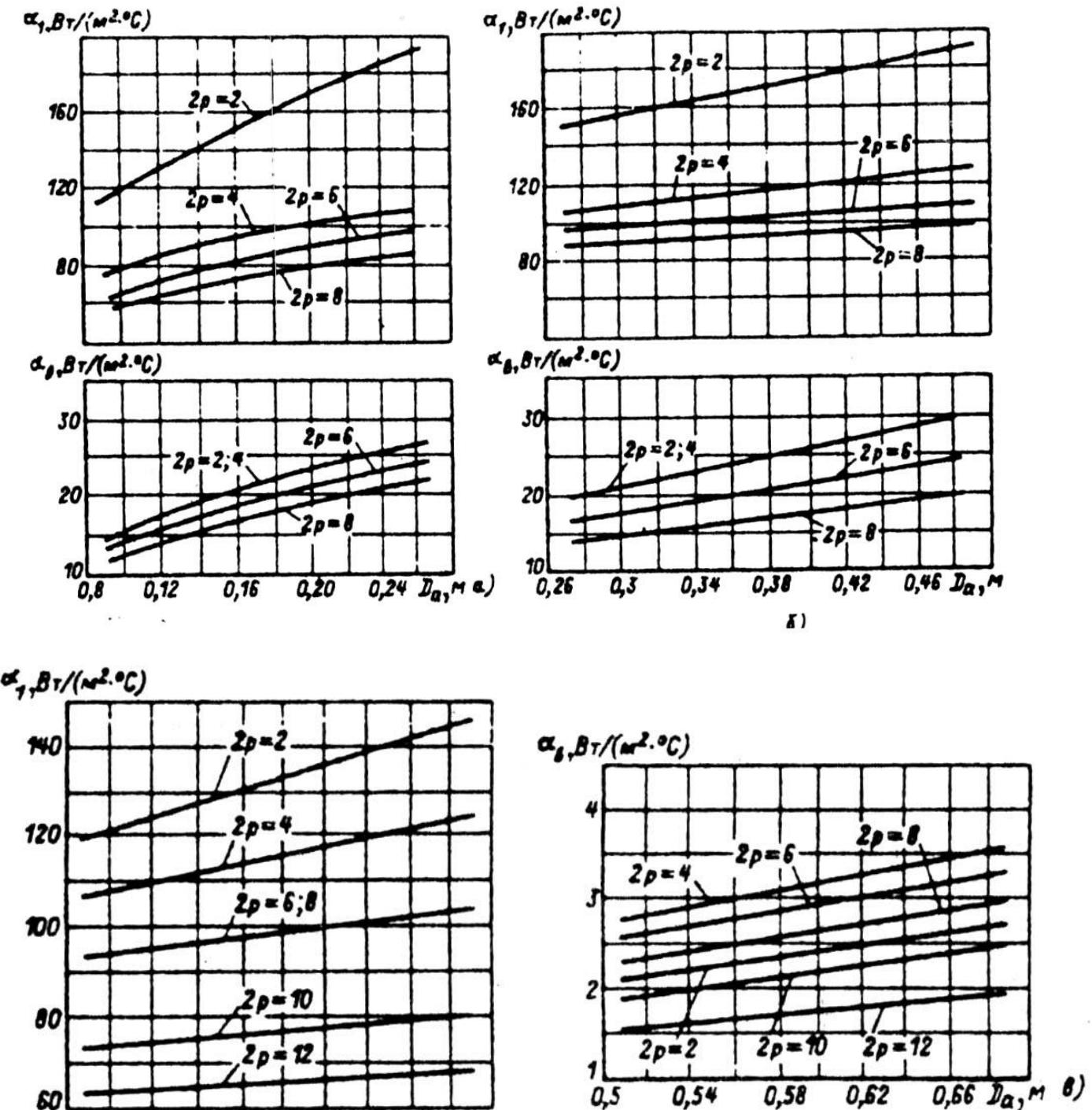


Рис. 9.67. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха α_2 , для асинхронных двигателей исполнения IP44:
а — при $h < 160$ мм; б — при $h = 160...250$ мм; в — при $h \geq 280$ мм (для двигателей с продуваемым ротором)

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, $^\circ\text{C}$,

$$\Delta \mathcal{G}_{H3,Pl} = \frac{P'_{\vartheta,Pl}}{Z_1 \prod_{Pl} l_1} \left(\frac{b_{H3l}}{\lambda_{\vartheta KB}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{\vartheta KB}} \right), \quad (9.316)$$

где \prod_{Pl} — расчетный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полузакрытых трапецидальных пазов (см. рис. 9.29, а):

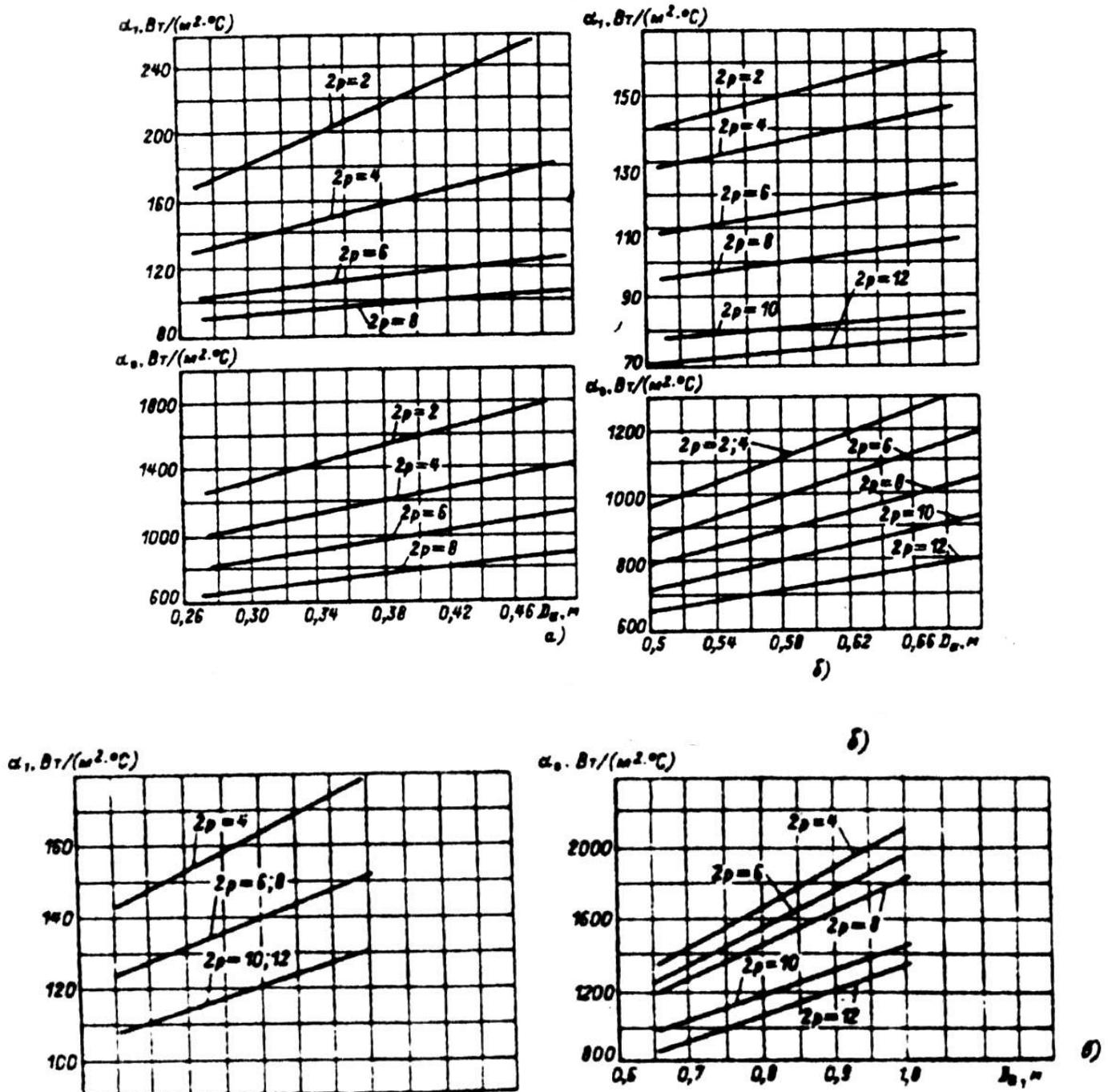


Рис. 9.68. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха α_B для асинхронных двигателей исполнения IP23:

а — при $h = 160 \dots 250$ мм, $U_{\text{ном}} = 660$ В;

б — при $h \geq 280$ мм, $U_{\text{ном}} = 660$ В;

в — при $U_{\text{ном}} = 6000$ В

$$\Pi_{n1} = 2h_{n,k} + b_1 + b_2 \quad (9.317)$$

($h_{n,k}$, b_1 , b_2 — размеры паза в штампе); для прямоугольных открытых и полуоткрытых пазов (см. рис. 9.28):

$$\Pi_{n1} = 2(h_n + b_n);$$

b_{iz1} — односторонняя толщина изоляции в пазу; для всыпной обмотки b_{iz1} берется по соответствующим таблицам (см. гл. 3). Для обмоток из прямоугольного провода

$$b_{uzl} = (b_n - n_{el}b)0,5 \quad (9.318)$$

где n_{el} и b — число и ширина неизолированных элементарных проводников, расположенных в одном слое по ширине паза; λ_{ekb} — средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции; для классов нагревостойкости В, F и H $\lambda_{ekb} = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$; λ'_{ekb} , — среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников с учетом неплотности прилегания проводников друг к другу; значение λ'_{ekb} берется по рис. 9.69; для обмоток из прямоугольного провода в (9.316) принимают $\frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{ekb}} = 0$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей

$$\Delta \vartheta_{iz.l1} = \frac{P'_{el.l1}}{2Z_1 \Pi_{l1} l_{l1}} \left(\frac{b_{iz.l1}}{\lambda_{ekb}} + \frac{h_{pl}}{12\lambda'_{ekb}} \right), \quad (9.319)$$

где Π_{l1} — периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки; $\Pi_{l1} \approx \Pi_{pl}$; $b_{iz.l1}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки (по табл. гл. 3). При отсутствии изоляции в лобовых частях $b_{iz.l1} = 0$; λ'_{ekb} для всыпной обмотки определяется по рис. 9.69. Для катушек из прямоугольного провода принимают $h_{pl}/(12\lambda'_{ekb}) = 0$.

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \vartheta_{pov.l1} = \frac{K P'_{el.l1}}{2\pi D l_{vyl1} \alpha_1} \quad (9.320)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \vartheta'_1 = [(\Delta \vartheta_{pov} + \Delta \vartheta_{iz.pl}) 2l_1 + (\Delta \vartheta_{iz.l1} + \Delta \vartheta_{pov.l1}) 2l_{l1}] / l_{cp.1} \quad (9.321)$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется в предположении, что температура корпуса равна температуре воздуха внутри машины. При этом условии

$$\Delta \vartheta_B = \sum P'_B / (S_{kop} \alpha_B) \quad (9.322)$$

где $\sum P'_B$ — сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт; α_B — коэффициент подогрева воздуха, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C})$, учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины (см. рис. 9.67, 9.68); S_{kop} — эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м^2 . Для двигателей со степенью защиты IP23

$$\sum P'_B = \sum P' - (1 - K)(P'_{el.l1} + P_{ct.och}), \quad (9.323)$$

где

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{\vartheta 1} + P_{\vartheta 2}); \quad (9.324)$$

$\sum P$ — сумма всех потерь в двигателе при номинальном режиме и расчетной температуре.

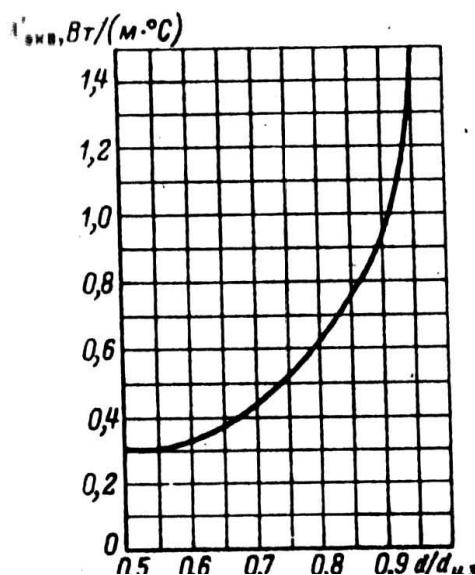


Рис. 9.69. Средние значения коэффициентов теплопроводности $\lambda'_{экв}$ внутренней изоляции в катушках обмотки из круглого эмалированного провода

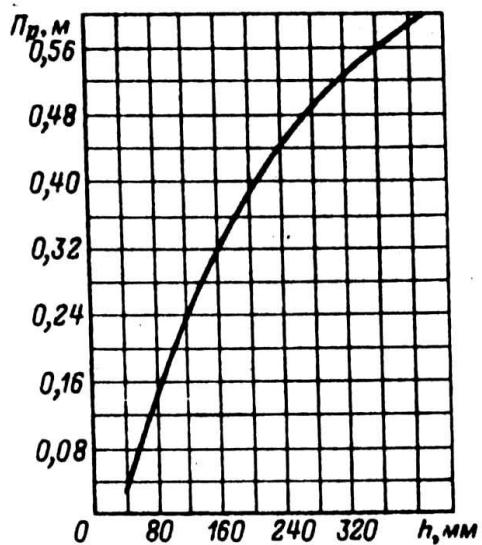


Рис. 9.70. Средние значения периметра поперечного сечения ребер корпуса асинхронных двигателей

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м^2 ,

$$S_{коп} = \pi D_a(l_1 + 2l_{бывл}). \quad (9.325)$$

Для двигателей со степенью защиты IP44 при расчете $\sum P'_в$ не учитывают также мощность, потребляемую наружным вентилятором, которая составляет примерно 0,9 суммы полных механических потерь:

$$\sum P'_в = \sum P' - (1 - K)(P'_{э.н1} + P_{см.очн}) - 0,9P_{мех}, \quad (9.326)$$

где $\sum P'$ — по (9.324).

При расчете $S_{коп}$ учитывают поверхность ребер станины:

$$S_{коп} = (\pi D_a + 8\Pi_p)(l_1 + 2l_{бывл}), \quad (9.327)$$

где Π_p — условный периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя; значение Π_p может быть принято приближенно по кривой рис. 9.70.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \mathcal{J}_1 = \Delta \mathcal{J}'_1 + \Delta \mathcal{J}_B, \quad (9.328)$$

Из-за приближенного характера расчета $\Delta \mathcal{J}_1$, должно быть, по крайней мере, на 20 % меньше, чем допускаемое превышение температуры для принятого класса изоляции (см. табл. 7.1).

Превышение температуры обмотки фазного ротора определяется аналогично в следующей последовательности.

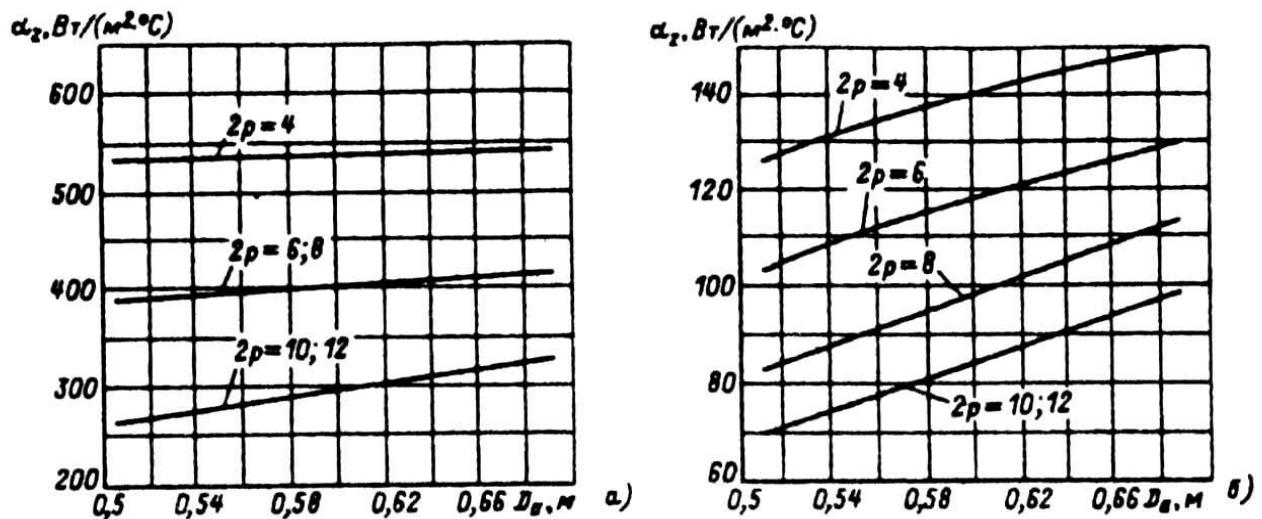


Рис. 9.71. Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности от фазных роторов асинхронных двигателей с $U_{\text{ном}} = 660$ В:
а — исполнения IP44 с продуваемым ротором; б — исполнения IP23

Превышение температуры магнитопровода ротора над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{пов2}} = \frac{P'_{\text{э.п2}}}{\pi D_2 l_2 \alpha_2}, \quad (9.329)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи, определяемый по рис. 9.71 и 9.72; $P'_{\text{э.п2}}$ — электрические потери в пазовой части обмотки ротора:

$$P'_{\text{э.п2}} = k_p P_{\text{э2}} \frac{2l_2}{l_{CP2}} \quad (9.330)$$

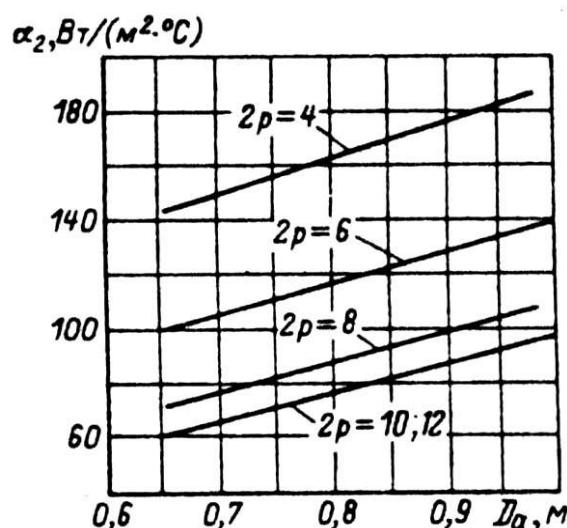


Рис. 9.72. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_2 фазных роторов асинхронных двигателей с $U_{\text{ном}} = 6000$ В исполнения IP23

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки ротора, $^{\circ}\text{C}$

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{из.п2}} = \frac{P'_{\text{э.п2}} b_{\text{из.п2}}}{Z_2 \Pi_{\text{п2}} l_2 \lambda_{\text{ЭКВ}}}, \quad (9.331)$$

где $\Pi_{\text{п2}}$ — периметр паза ротора. Для прямоугольных пазов

$$\Pi_{\text{п2}} = 2(h_{\text{п2}} + b_{\text{п2}}). \quad (9.332)$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{пов.л2}} = \frac{P'_{\text{э.л2}}}{2\pi D_2 b_{\text{выл2}} \alpha_2}, \quad (9.333)$$

где $P'_{\text{эл2}}$ — электрические потери в лобовых частях обмотки, Вт:

$$P'_{\text{эл2}} = k_p P_{\mathcal{E}I} \frac{2l_{\text{л2}}}{l_{\text{cp2}}} \quad (9.334)$$

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки ротора, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{из.л2}} = \frac{P'_{\text{э.л2}} b_{\text{из.л2}}}{2Z_2 \Pi_{\text{л2}} l_{\text{л2}} \lambda_{\text{ЭКВ}}} \quad (9.335)$$

где $\Pi_{\text{л2}}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки: $\Pi_{\text{л2}} = \Pi_{\text{п2}}$; $b_{\text{из.л2}}$ — односторонняя толщина изоляции лобовых частей (по табл. гл. 3).

Среднее превышение температуры обмотки ротора над температурой воздуха внутри двигателя, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \mathcal{G}'_2 = \frac{(\Delta U_{\text{пов2}} + \Delta U_{\text{из.п2}}) 2l_2 + (\Delta \mathcal{G}_{\text{пов.л2}} + \Delta \mathcal{G}_{\text{из.л2}}) 2l_{\text{л2}}}{l_{\text{cp2}}} \quad (9.336)$$

Среднее превышение температуры обмотки ротора над окружающей средой, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \mathcal{G}_2 = \Delta \mathcal{G}'_2 + \Delta \mathcal{V}'_B. \quad (9.337)$$

Вентиляционный расчет асинхронных двигателей, так же как и тепловой на первоначальном этапе проектирования, может быть выполнен приближенным методом, который заключается в

сопоставлении расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

Для двигателей со степенью защиты IP23 требуемый для охлаждения расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$Q_e = \sum P'_e / (1100 \Delta \vartheta_B), \quad (9.338)$$

где $\sum P'_e$ — по (9.326); $\Delta \vartheta_B$ — превышение температуры выходящего из двигателя воздуха над температурой входящего; приближенно $\Delta \vartheta_B' = 2 \Delta v'_B$, где $\Delta v'_B$ — по (9.322).

Расход воздуха, который может быть получен при данных размерах двигателя, оценивается по эмпирической формуле

$$Q'_e = m'(n_k b_k + 0,1) \frac{n}{100} D_a^2, \quad (9.339)$$

где n_k и b_k — число и ширина, м, радиальных вентиляционных каналов; n — частота вращения двигателя, об/мин; m' — коэффициент ($m' = 2,6$ для двигателя с $2p = 2$; $m' = 3,15$ для двигателя с $2p \geq 4$).

Формула (9.339) приближенно учитывает суммарное действие всех нагнетательных элементов в двигателе: лопаток на замыкающих кольцах литой клетки, вылетов стержней при сварных клетках короткозамкнутых роторов, лобовых частей фазных роторов, вентиляционных распорок в радиальных каналах и др.

Для двигателей со степенью защиты IP44 требуемый для охлаждения расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$Q_e = k_m \sum P'_e / (1100 \Delta \vartheta_B), \quad (9.340)$$

где k_m — коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором:

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n}{100} D_a} \quad (9.341)$$

Коэффициент $m' = 2,6$ для двигателей с $2p = 2$ при $h \leq 132$ мм и $m' = 3,3$ при $h \geq 160$ мм; $m' = 1,8$ для двигателей с $2p \geq 4$ при $h \leq 132$ мм и $m' = 2,5$ при $h \geq 160$ мм.

Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$, обеспечиваемый наружным вентилятором, может быть приближенно определен по следующей формуле:

$$Q'_e = 0,6 D_a^3 \frac{n}{100}. \quad (9.342)$$

Расход воздуха Q'_e должен быть больше требуемого для охлаждения машины Q_B .

На этом, если не требуется более детального определения температуры отдельных элементов, расчет асинхронного двигателя может быть закончен. Для уточненного расчета теплового режима двигателя могут быть использованы методы, рассмотренные в гл. 7.

9.16. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

9.16.1 Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Техническое задание

Спроектировать асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором: $P_2 = 15 \text{ кВт}$, $U = 220/380 \text{ В}$, $2p = 4$; конструктивное исполнение IM 1001; исполнение по способу защиты IP44; способ охлаждения IC0 141; климатическое исполнение и категория размещения УЗ, класс нагревостойкости изоляции F.

Выбор главных размеров

1. Высота оси вращения (предварительно) по рис. 9.18, $a h = 0,17 \text{ м}$. Принимаем ближайшее стандартное значение $h = 160 \text{ мм}$; $D_a = 0,272 \text{ м}$ (см. табл. 9.8).

2. Внутренний диаметр статора $D = k_D D_a = 0,68 \cdot 0,272 = 0,185 \text{ м}$, k_D — по табл. 9.9.

3. Полярное деление $\tau = \pi D/(2p) = \pi 0,185/4 = 0,145 \text{ м}$.

4. Расчетная мощность по (9.4)

$$P' = mIE = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 0,975}{0,88 \cdot 0,88} = 18885 \approx 18900 \text{ В} \cdot \text{А}$$

(k_E — по рис. 9.20; η и $\cos \varphi$ — по рис. 9.21, а).

5. Электромагнитные нагрузки (предварительно по рис. 9.22, б)

$A = 32 \cdot 10^3 \text{ А/м}$; $B_\delta = 0,75 \text{ Тл}$

6. Обмоточный коэффициент (предварительно для однослойной обмотки) $k_{ob1} = 0,95$.

7. Расчетная длина магнитопровода по (9.6)

$$l_\delta = \frac{p'}{D^2 \Omega k_B k_{ob1} A B_\delta} = \frac{18900}{1,1 \cdot 0,185^2 \cdot 157 \cdot 0,95 \cdot 32 \cdot 10^3 \cdot 0,75} = 0,139 \approx 0,14 \text{ м}$$

(по (9.5) $\Omega = 2nf / p = 2n \cdot 50/2 = 157 \text{ рад/с}$].

8. Отношение $\lambda = l_\delta / \tau = 0,14/0,145 = 0,97$. Значение $\lambda = 0,97$ находится в допустимых пределах (см. рис. 9.25).

Определение Z_1 , w_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора

9. Предельные значения t_{z1} (по рис. 9.26): $t_{z1max} = 15 \text{ мм}$; $t_{z1min} = 12 \text{ мм}$.

10. Число пазов статора по (9.16)

$$Z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{z1max}} = \frac{\pi \cdot 0,185}{0,015} = 39$$

$$Z_{2max} = \frac{\pi D}{t_{z1min}} = \frac{\pi \cdot 0,185}{0,012} = 48$$

Принимаем $Z_1 = 48$, тогда $q_1 = Z_1/(2pm) - 48/(4 \cdot 3) = 4$. Обмотка однослойная.

11. Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{\pi \cdot 0,185}{4 \cdot 3 \cdot 4} = 12,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

12. Число эффективных проводников в пазу [предварительно, при условии $a = 1$ по (9.17)]

$$u_n = \frac{\pi D A}{I_{1HOM} Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,185 \cdot 32 \cdot 10^3}{29,3 \cdot 48} = 13,2$$

(по 9.18)

$$I_{1HOM} = \frac{P_2}{m U_{1HOM} \cos \varphi \eta} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,88} = 29,3 \text{ А}$$

13. Принимаем $a = 1$, тогда по (9.19) $u_n = a u'_n = 13$ проводников.

14. Окончательные значения:

число витков в фазе по (9.20)

$$W_1 = \frac{u_n Z_1}{2am} = \frac{13 \cdot 48}{2 \cdot 3} = 104$$

линейная нагрузка по (9.21)

$$A = \frac{2 I_{1HOM} W_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 29,3 \cdot 104 \cdot 3}{\pi \cdot 0,185} = 31,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

магнитный поток по (9.22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{1HOM}}{4k_B W_1 k_{o61} f_1} = \frac{0,975 \cdot 220}{4,44 \cdot 104 \cdot 0,958 \cdot 50} = 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

(для однослойной обмотки с $q = 4$ по табл. 3.16 $k_{o61} = k_{p1} = 0,958$; для $D_a = 0,272$ м по рис. 9.20 $k_E = 0,975$);

индукция в воздушном зазоре по (9.23)

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{D l_\delta} = \frac{2 \cdot 9,7 \cdot 10^{-3}}{0,185 \cdot 0,14} = 0,749 \text{ Тл}$$

Значения A и B_δ находятся в допустимых пределах (см. рис. 9.22, б).

15. Плотность тока в обмотке статора (предварительно) по (9.25). A по п. 14 $31,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}$

$$J_1 = \frac{A J_1}{A} = \frac{180 \cdot 10^9}{31,5 \cdot 10^3} = 5,71 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

$(AJ_1 = 180 \cdot 10^9 \text{ по рис. 9.27, б}).$

16. Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно) по (9.24), $a = 1$.

$$q_{\vartheta\phi 1} = \frac{I_{1HOM}}{a J_1} = \frac{29,3}{5,71 \cdot 10^6} = 5,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 5,13 \text{ мм}^2.$$

17. Сечение эффективного проводника (окончательно): принимаем $n_{\vartheta\ell} = 3$, тогда $q_{\vartheta\ell} = q_{\vartheta\phi}/n_{\vartheta\phi} = 5,13/3 = 1,71 \text{ мм}^2$. Принимаем обмоточный провод марки ПЭТВ (см. приложение 3), $d_{\vartheta\ell} = 1,5 \text{ мм}$, $q_{\vartheta\ell} = 1,767 \text{ мм}^2$, $q_{\vartheta\text{ср}} = n_{\vartheta\ell} q_{\vartheta\ell} = 3 \cdot 1,767 = 5,3 \text{ мм}^2$.

18. Плотность тока в обмотке статора (окончательно) по (9.27)

$$J_1 = \frac{I_{1HOM}}{a q_{\vartheta\ell} n_{\vartheta\ell}} = \frac{29,3}{1,767 \cdot 3} = 5,53 \text{ А/мм}^2.$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора определяем по рис. 9.29, a с соотношением размеров, обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов.

19. Принимаем предварительно по табл. 9.12 $B_{z1} = 1,9 \text{ Тл}$; $B_a = 1,6 \text{ Тл}$, тогда по (9.37)

$$b_{z1} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{B_{zcc} l_{CT1} k_c} = \frac{0,749 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{1,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,9 \text{ мм}$$

(по табл. 9.13 для оксидированной стали марки 2013 $k_c = 0,97$);

по (9.28)

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{CT1} k_c} = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,6 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 22,3 \text{ мм}.$$

20. Размеры паза в штампе: $b_{ш} = 3,7 \text{ мм}$; $h_{ш} = 1 \text{ мм}$; 45° (см. рис. 9.29, а);

по (9.38)

$$h_{\pi} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0,272 - 0,185}{2} - 0,0223 = 0,0212 \text{ м} = 21,2 \text{ мм};$$

по (9.40)

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{\pi} - b_{\pi}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi(185 + 2 - 3,7) - 48 \cdot 4,9}{48 - \pi} = 7,59 \approx 7,6 \text{ мм}$$

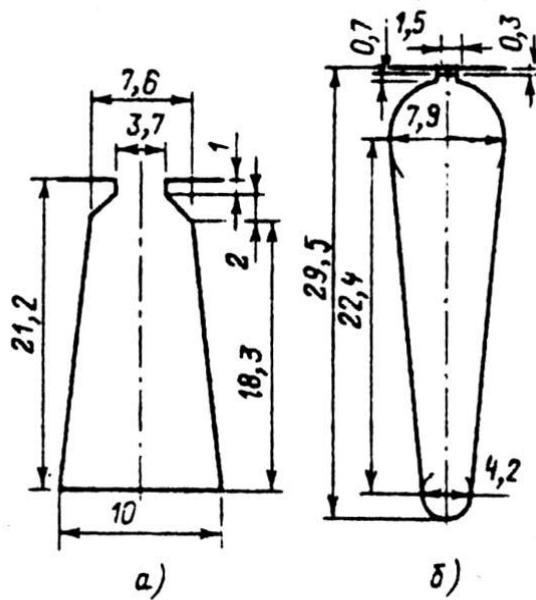


Рис. 9.73. Пазы спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_2 = 15 \text{ кВт}$, $2p = 4$, $U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$)

по (9.39)

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{\pi})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi(185 + 2 \cdot 21,2)}{48} - 4,9 = 9,98 = 10 \text{ мм}^2;$$

по (9.42)–(9.45)

$$h_{\pi,k} = h_{\pi} - \left(h_{\pi} + \frac{b_1 - b_{\pi}}{2} \right) = 21,2 - \left(1 + \frac{7,6 - 3,7}{2} \right) = 18,25 \approx 18,3 \text{ мм}$$

Паз статора показан на рис. 9.73, а.

21. Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_{\pi} = 7,6 - 0,2 = 7,4 \text{ мм}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_{\pi} = 10 - 0,2 = 9,8 \text{ мм}$$

$$b'_{\pi,k} = h_{\pi,k} - \Delta h = 18,3 - 0,2 = 18,1 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки по (9.48)

$$S'_{\pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h_{\pi,k} - (S_{iz} + S_{pr}) = \frac{7,4 + 9,8}{2} 18,1 - 24 = 131,7 \text{ мм}^2$$

[площадь поперечного сечения прокладок $S_{pr} = 0$; площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу

$$S_{iz} = b_{iz}(2h_{\pi} + b_1 + b_2) = 0,4(2 \cdot 21,2 + 7,6 + 10) = 24 \text{ мм}^2,$$

где односторонняя толщина изоляции в пазу $b_{iz} = 0,4 \text{ мм}$ — по табл. 3.1].

22. Коэффициент заполнения паза по (3.2):

$$k_{\vartheta} = \frac{d_{iz}^2 u_{\pi} n_{\vartheta\pi}}{S'_{\pi}} = \frac{1,585^2 \cdot 13 \cdot 3}{131,7} = 0,74$$

Полученное значение k_3 допустимо для механизированной укладки обмотки.

Расчет ротора

23. Воздушный зазор (по рис. 9.31) $\delta = 0,5$ мм.

24. Число пазов ротора (по табл. 9.18) $Z_2 = 38$.

25. Внешний диаметр ротора $D_2 = D - 2\delta = 0,185 - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,184$ м.

26. Длина магнитопровода ротора $l_2 = l_1 = 0,14$ м.

27. Зубцовое деление ротора

$$t_{z2} = \pi D_2 / Z_2 = \pi 0,184 / 38 = 0,0152 \text{ м} = 15,2 \text{ мм.}$$

28. Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал; по (9.102)

$$D_j = D_B = k_B D_a = 0,23 \cdot 0,272 = 0,0626 \text{ м} \approx 60 \text{ мм}$$

(k_B — по табл. 9.19).

29. Ток в обмотке ротора по (9.57)

$$I_2 = k_i I_1 v_i = 0,904 \cdot 29,3 \cdot 15,73 = 417 \text{ А},$$

где по (9.58) $k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,88 = 0,904$;

по (9.66)

$$v_i = \frac{2m_i w_i k_{ob1}}{Z_2 k_{ck}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0,958}{38} = 15,73$$

(пазы ротора выполняем без скоса — $k_{ck} = 1$)

30. Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) по (9.68)

$$q_n = I_2 / J_2 = 417 / (2,5 \cdot 10^6) = 166,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 166,8 \text{ мм}^2$$

(плотность тока в стержне литой клетки принимаем $J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$).

31. Паз ротора определяем по рис. 9.40, б. Принимаем $b_{ш} = 1,5$ мм; $h_{ш} = 0,7$ мм; $h'_{ш} = 0,3$ мм.

Допустимая ширина зубца по (9.75)

$$b_{z2, доп} = \frac{B_\delta t_{z2} l_\delta}{B_{z2} l_{ct2} k_c} = \frac{0,749 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{1,8 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 6,52 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6,5 \text{ мм}$$

(принимаем $B_{z2} = 1,8$ Тл по табл. 9.12).

Размеры паза (см. рис. 9.40):

по (9.76)

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{ш} - 2h'_{ш}) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2} = \frac{\pi(184 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 38 \cdot 6,5}{\pi + 38} = 7,9 \text{ мм}$$

по (9.77)

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 (Z_2 / \pi D_2 + \pi / 2) - 4q_c}{Z_2 / \pi + \pi / 2}} = \sqrt{\frac{7,9^2 (\frac{38}{\pi} + \frac{\pi}{2}) - 4 \cdot 166,8}{\frac{38}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = 4,2 \text{ мм}$$

по (9.78)

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi} = (7,9 - 4,2) \frac{38}{2\pi} = 22,38 \approx 22,4 \text{ мм.}$$

32. Уточняем ширину зубцов ротора по формулам табл. 9.20:

$$b'_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{ш} + h'_{ш})b_1}{Z_2} - b_1 = \pi \frac{184 - 2(0,7 + 0,3) - 7,9}{38} - 7,9 = 6,49 \text{ мм} \approx 6,5 \text{ мм};$$

$$b''_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2h_{ш} + b_2 - b_1}{Z_2} - b_2 = \pi \frac{184 - 2 \cdot 29,4 + 4,2}{38} - 4,2 = 6,5 \text{ мм}$$

$$b'_{z2} = b''_{z2} \approx 6,5 \text{ мм}$$

Принимаем (см. рис. 9.73, б) $b_1 = 7,9$; $b_2 = 4,2$ мм; $h_1 = 22,4$ мм.

Полная высота паза

$$h_{n2} = h'_{III} + h_{III} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,3 + 0,7 + \frac{7,9}{2} + 22,4 + \frac{4,2}{2} = 29,5 \text{ мм}$$

33. Площадь поперечного сечения стержня по (9.79)

$$q_c = \frac{\pi}{8}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)h_1 = \frac{\pi}{8}(7,9^2 + 4,2^2) + 0,5(7,9 + 4,2)22,4 = 166,96 \approx 167 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне

$$J_2 = I_2/q_c = 417/167 \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$$

34. Короткозамыкающие кольца (см рис. 9.37, б). Площадь поперечного сечения кольца по (9.72)

$$q_{kl} = \frac{I_{kl}}{J_{kl}} = \frac{1267}{2,13 \cdot 10^6} = 595 \text{ мм}^2$$

По (9.70) и (9.71)

$$I_{kl} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{417}{0,329} = 1267 \text{ А}$$

где

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha_z}{2} = 2 \sin \frac{\pi \rho}{Z_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{38} = 0,329 \text{ А}$$

$$J_{kl} = 0,85 J_2 = 0,85 \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Размеры короткозамыкающих колец:

$$h_{kl} = 1,25 h_{n2} = 1,25 \cdot 29,5 = 37 \text{ мм};$$

$$b_{kl} = q_{kl} / h_{kl} = 595/37 = 16 \text{ мм};$$

$$q_{kl} = h_{kl} / b_{kl} = 37 / 16 = 592 \text{ мм}^2;$$

$$D_{k,sp} = D_2 - h_{kl} = 184 - 37 = 147 \text{ мм.}$$

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2013; толщина листов 0,5 мм.

35. Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.103)

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,749 \cdot 1,22 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 726,5 \text{ А},$$

по(4.15)

$$k_\delta = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta} = \frac{12,1}{12,1 - 4,42 \cdot 0,5} = 1,22,$$

где

$$\gamma_1 = \frac{(b_{III}/\delta)^2}{5 + b_{III}/\delta} = \frac{(3,7/0,5)^2}{5 + 3,7/0,5} = 4,42$$

36. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (9.104)

$$F_{z1} = 1h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 21,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2070 = 87,8 \text{ А},$$

где $h_{z1} = H_{n1} = 21,2 \text{ мм}$ (см п. 20 расчета);

расчетная индукция в зубцах по (9.105)

$$B'_{z1} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{b_{z1} l_{ct1} k_{c1}} = \frac{0,749 \cdot 12,1 \cdot 0,14}{4,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,91 \text{ Тл}$$

($b_{z1} = 4,9$ мм по п. 19 расчета; $k_{c1} = 0,97$ по табл. 9.13). Так как $B'_{z1} > 1,8$ Тл, необходимо учесть ответвление потока в паз и найти действительную индукцию в зубце B_{Z1} . Коэффициент $k_{\text{ПХ}}$ по высоте $h_{zx} = 0,5 h_z$ по (4.33)

$$k_{\text{ПХ}} = \frac{b_{\text{ПХ}} l_{\delta}}{b_{zx} l_{ct1} k_{c1}} = \frac{0,749 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 0,14}{4,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,85$$

где

$$b_{\text{ПХ}} = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{7,6 + 10}{2} = 8,8$$

по (4.32)

$$B_{Z1} = B'_{z1} - \mu_0 H_{Z1} k_{\text{ПХ}}$$

Принимаем $B_{z1} = 1,9$ Тл, проверяем соотношение B_{Z1} и B'_{z1} :

$$1,9 = 1,91 - 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2070 \cdot 1,85 = 1,9,$$

где для $B_{z1} = 1,9$ Тл по табл. П1.7 $H_{Z1} = 2070$ А/м.

37. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора по (9.108)

$$F_{Z2} = 2h_{z2} H_{z2} = 2 \cdot 0,029 \cdot 1570 = 91,1 \text{ А}$$

при зубцах по рис. 9.40, б из табл. 9.20 $h_{z2} = h_{\Pi2} - 0,1$ $b_2 = 29,4 - 0,1 \cdot 4,2 = 29$ мм;
индукция в зубце по (9.109)

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{z2} l_{\delta}}{b_{z2} l_{ct2} k_{c2}} = \frac{0,749 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,81 \text{ Тл}$$

по табл. П1.7 для $B_{z2} = 1,81$ Тл находим $H_{z2} = 1570$ А/м

38. Коэффициент насыщения зубцовой зоны по (9.115)

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{87,8 + 91,1}{726,5} = 1,25$$

39. Магнитное напряжение ярма статора по (9.116)

$$F = L_a H_a = 0,196 \cdot 750 = 147 \text{ А},$$

по (9.119)

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} = \pi \frac{0,272 - 0,0223}{4} = 0,196 \text{ м};$$

где

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{\Pi1} = \frac{0,272 - 0,185}{2} - 21,2 \cdot 10^{-3} = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

по (9.117)

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a l_{ct1} k_{c1}} = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ Тл}$$

(при отсутствии радиальных вентиляционных каналов в статоре $h'_a = h_a = 22,3 \cdot 10^{-3}$ м),
для $B_a = 1,6$ Тл по табл. П1.6 находим $H_a = 750$ А/м.

40. Магнитное напряжение ярма ротора по (9.121)

$$F_j = L_j H_j = 72,7 \cdot 10^{-3} \cdot 155 = 11,3 \text{ А}.$$

По (9.127)

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2P} = \frac{\pi(60 + 32,6) \cdot 10^{-3}}{4} = 72,7 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

где

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\Pi2} = \frac{0,184 - 0,06}{2} - 29,4 \cdot 10^{-3} = 32,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

по (9.122)

$$B_j = \frac{\Phi}{2h'_j l_{CT2} k_{C2}} = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 39,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 0,91 \text{ Тл}$$

где по (9.124) для четырехполюсных машин при $0,75 (0,5 D_2 - h_{n2}) < D_j$

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_{K2} m_{K2} = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} (0,5 \cdot 0,184 - 29,4 \cdot 10^{-3}) = 39,1 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где для $m_{K2} = 0,91$ Тл по табл. П1.6 находим $H_j = 155 \text{ А/м}$.

41. Магнитное напряжение на пару полюсов (по 9.128)

$$F_{\Pi} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 726,5 + 87,8 + 91,1 + 147 + 11,3 = 1063,7 \text{ А.}$$

42. Коэффициент насыщения магнитной цепи по (9.129)

$$k_{\mu} = F_{\Pi} / F_{\delta} = 1063,7 / 726,5 = 1,46.$$

43. Намагничивающий ток по (9.130)

$$I_{\mu} = \frac{p F_{\Pi}}{0,9 m_1 w_1 k_{OB1}} = \frac{2 \cdot 1063,7}{0,9 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0,958} = 7,91 \text{ А.}$$

Относительное значение по (9.131)

$$I_{\mu*} = I_{\mu} / I_{1HOM} = 7,91 / 29,3 = 0,27.$$

$$0,2 < I_{\mu*} < 0,3.$$

Параметры рабочего режима

44. Активное сопротивление обмотки статора по (9.132)

$$r_1 = k_R \rho_{115} \frac{L}{q_{\phi_1} a} = \frac{10^{-6} \cdot 77,17}{41 \cdot 5,3 \cdot 10^{-6}} = 0,355 \text{ Ом}$$

(для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура $v_{расч} = 115^\circ \text{ C}$; для медных проводников $\rho_{115} = 10^{-6} / 41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

Длина проводников фазы обмотки по (9.134)

$$L_1 = l_{cp1} w_1 = 0,742 \cdot 10^4 = 77,17 \text{ м};$$

по (9.135) $l_{cp1} = 2(l_{\Pi1} + l_{\lambda1}) = 2(0,14 + 0,231) = 0,742 \text{ м}; l_{\Pi1} = l_1 = 0,14 \text{ м};$ по (9.136)

$l_{\lambda1} = K_{\lambda} b_{KT} + 2B = 1,3 \cdot 0,162 + 2 \cdot 0,01 = 0,231 \text{ м}$, где $B = 0,01 \text{ м}$; по табл. 9.23 $K_{\lambda} = 1,3$;

по (9.138)

$$b_{KT} = \frac{\pi(D + h_{\Pi1})}{2p} \beta = \frac{\pi(0,185 + 0,0212)}{4} = 0,162 \text{ м}$$

Длина вылета лобовой части катушки по (9.140)

$$l_{выл} = k_{выл} B_{KT} + B = 0,4 \cdot 0,162 + 0,01 = 0,0748 \text{ м} = 74,8 \text{ мм},$$
 где по табл. 9.23 $K_{выл} = 0,4$.

Относительное значение r_1

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}} = 0,355 \frac{29,3}{220} = 0,047.$$

45. Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора по (9.168)

$$r_2 = r_c + \frac{2r_k}{\Delta} = 40,89 \cdot 10^{-6} = 40,89 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,329^2} = 59,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

по (9.169)

$$r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{k_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} \frac{0,14}{167 \cdot 10^{-6}} = 40,89 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

здесь $k_r = 1$;

по (9.170)

$$r_{KL} = \rho_{115} \frac{\pi D_{KL,CP}}{Z_2 q_{KL}} = \frac{10^{-6} \pi \cdot 0,147}{20,5 \cdot 38 \cdot 595 \cdot 10^{-6}} = 10^{-6} \text{ Ом},$$

где для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора по (9.172), (9.173):

$$r'_2 = r_2 \frac{4m_1 (w_1 k_{OBI})^2}{Z_2 k_{CK}^2} = 59,37 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(104 \cdot 0,958)^2}{38} = 0,186 \text{ Ом},$$

здесь $k_{c1} = 1$.

Относительное значение

$$r'_2 = r_2 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}} = 0,186 \cdot \frac{29,3}{220} = 0,0248$$

46. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по (9.152)

$$X_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1} + \lambda_{d1}) = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{104}{100} \right)^2 \frac{0,14}{2 \cdot 4} (1,42 + 1,34 + 1,74) = 673 \text{ Ом},$$

где по табл. 9.26 (см. рис. 9.50, е) и по рис. 9.73

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_K}{b_1 + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_\beta = \frac{17,3}{3 \cdot 7,6} + \frac{3 \cdot 1,95}{7,6 + 2 \cdot 3,7} + \frac{1}{3,7} = 1,42$$

где (см. рис. 9.50, е и 9.73)

$h_2 = h_{\Pi,K} - 2b_{из} = 18,1 - 2 \cdot 0,4 = 17,3 \text{ мм}; b_1 = 7,6 \text{ мм}; h_K = 0,5(b_1 - b_{III}) = 0,5(7,6 - 3,7) = 1,95 \text{ мм}; h_1 = 0$ (проводники закреплены пазовой крышкой); $k_\beta = 1; k'_\beta = 1; l'_\delta = l_\delta = 0,14 \text{ м}$ по (9.154); по (9.159)

$$\lambda_{\pi 1} = 0,34 \frac{q}{l'_\delta} (l_{\pi 1} - 0,64\beta\tau) = 0,34 \frac{4}{0,14} (0,231 - 0,64 \cdot 0,145) = 1,34;$$

по (9.174)

$$\lambda_{d1} = \frac{t_{z1}}{12\delta k_\delta} \xi = \frac{12,1}{12 \cdot 0,5 \cdot 1,22} 1,05 = 1,74$$

по (9.176)

$$\xi = 2k'_CK_\beta - k_{OBI}^2 \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 (1 + \beta_{CK}^2) = 2 \cdot 1,25 - 0,958^2 \left(\frac{15,2}{12,1} \right)^2 = 1,05$$

для $\beta_{CK} = 0$ и $t_{z2}/t_{z1} = 15,2/12,1 = 1,26$ по рис. 9.51, $\partial k'_{CK} = 1,25$.

Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}} = 0,673 \frac{29,3}{220} = 0,09$$

47. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по (9.177)

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_\delta 10^{-6} (\lambda_\pi + \lambda_\pi + \lambda_d + \lambda_{CK}) = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,14 (2,58 + 0,59 + 2,09) = 291 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где по табл. 9.27 (см. рис. 9.52, а, ж)

$$\left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{III}}{2b_1} \right] k_d + \frac{h_{III}}{b_{III}} + 1,12 \frac{h_{III} \cdot 10^6}{I_2} = \frac{24,08}{3 \cdot 7,9} \left(1 - \frac{\pi \cdot 7,9^2}{8 \cdot 167} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,9} + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \frac{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{417} = 2,58$$

где (см. рис. 9.52, а, ж и рис. 9.73)

$h_0 = h_1 + 0,4b_2 = 22,4 + 0,4 \cdot 4,2 = 24,08 \text{ мм}; b_1 = 7,9 \text{ мм}; b_{III} = 1,5 \text{ мм};$

$h_{III} = 0,7 \text{ мм}; h'_{III} = 0,3 \text{ мм}; q_c = 167 \text{ мм}^2$; по (9.178)

$$\lambda_{d2} = \frac{2,3D_{KL,CP}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{KL,CP}}{h_{KL} + 2b_{KL}} = \frac{2,3 \cdot 0,147}{38 \cdot 0,14 \cdot 0,329^2} \lg \frac{4,7 \cdot 0,147}{0,037 + 2 \cdot 0,016} = 0,587$$

по (9. 180)

$$\lambda_{d2} = \frac{t_z}{12\delta k_s} \xi = \frac{15,2 \bullet 1,005}{12 \bullet 0,5 \bullet 1,22} = 2,09$$

по (9.181)

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \rho}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - (p/Z_2)^2} = 1,005$$

так как при закрытых пазах $\Delta_z \approx 0$.

Приводим X_2 к числу витков статора по (9.172) и (9.183):

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(W_1 k_{OBI})^2}{Z_2 k_{CK}^2} = 291 \bullet 10^{-6} \frac{4 \bullet 3(104 \bullet 0,958)^2}{38} = 0,912 \text{ Ом.}$$

Относительное значение

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}} = 0,912 \frac{29,3}{220} = 0,121$$

Расчет потерь

48. Потери в стали основные по (9.187)

$$P_{ct.och} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 (k_{da} B_a^2 m_a + k_{dz} B_{cp}^2 m_z) = 2,5(1,6 \bullet 1,6^2 \bullet 18,53 + 1,8 \bullet 1,92^2 \bullet 5,28) = 276,4 \text{ Вт}$$

[$p_{1,0/5,0} = 2,5$ Вт/кг для стали 2013 по табл. 9.28];

по (9.188)

$$m_a = \pi(D_a - h_a) h_a l_{ct1} k_{c1} v_c = \pi(0,272 - 0,0223) \bullet 0,0223 \bullet 0,14 \bullet 0,97 \bullet 7,8 \bullet 10^3 = 18,53 \text{ кг};$$

по (9.189)

$$m_z = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{ct1} k_{c1} v_{c1} = 21,2 \bullet 10^{-3} \bullet 4,9 \bullet 10^{-3} \bullet 48 \bullet 0,14 \bullet 0,97 \bullet 7,8 \bullet 10^{-3} = 5,28 \text{ кг};$$

$k_{da} = 1,6$; $k_{dz} = 1,8$ (см. § 9.11)].

49. Поверхностные потери в роторе по (9.194)

$$P_{pov2} = p_{pov2}(t_{z2} - b_{w2}) Z_2 l_{ct2} = 242,4(15,2 - 1,5)38,0,14 = 17,7 \text{ Вт};$$

по (9.192)

$$P_{pov2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{0,2} t_{z1} \bullet 10^3)^2 = 0,5 \bullet 1,5 \left(\frac{48 \bullet 1500}{10000} \right)^{1,5} (0,338 \bullet 12,1)^2 = 242,4 \text{ Вт/м}^2.$$

где $k_{02} = 1,5$;

по (9.190)

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} k_\delta B_\delta = 0,37 \bullet 1,22 \bullet 0,749 = 0,338 \text{ Тл};$$

где $b_w/\delta = 3,7/0,5 = 7,4$ по рис. 9.53 $\beta_{02} = 0,37$.

50. Пульсационные потери в зубцах ротора по (9.200)

$$P_{pul2} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{ny2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{45 \bullet 1500}{1000} 0,132 \right)^2 7,59 = 75,4 \text{ Вт}$$

по (9.196)

$$B_{ny2} = \frac{\gamma 1 \delta}{2t_{z2}} B_{z2cp} = \frac{4,42 \bullet 0,5 \bullet 10^{-3}}{2 \bullet 15,2 \bullet 10^{-3}} 1,81 = 0,132 \text{ Тл}$$

$B_{z2cp} = 1,81$ Тл из п. 37 расчета; $\gamma_1 = 4,42$ из п. 35 расчета;

по (9.201)

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2cp} l_{ct2} k_{c2} = 38 \bullet 29 \bullet 10^{-3} \bullet 6,5 \bullet 10^{-3} \bullet 0,14 \bullet 0,97 \bullet 7800 = 7,59 \text{ кг};$$

$h_{z2} = 29$ мм из п. 37 расчета; $b_{z2} = 6,5$ мм из п. 32 расчета.

51. Сумма добавочных потерь в стали по (9.202)

$$P_{ct.dob} = P_{pov1} + P_{pul1} + P_{pov2} + P_{pul2} = 17,7 + 75,4 = 93,1 \text{ Вт}$$

(P_{pov1} и $P_{pul1} \approx 0$, см. § 9.11).

52. Полные потери в стали по (9.203)

$$P_{ct} = P_{ct,osn} + P_{ct,dob} = 276,4 + 93,1 = 369,5 \text{ Вт}$$

53. Механические потери по (9.210)

$$P_{mex} = K_m (n/10)^2 D_a^4 = 0,95 (1500/10)^2 0,272^4 = 117 \text{ Вт}$$

[для двигателей с $2p = 4$ коэффициент $K_t = 1,3(1 - D_a) = 1,3(1 - 0,272) = 0,95$].

54. Холостой ход двигателя:

по (9.217)

$$I_{x.x} = \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{x.x.p}^2} = \sqrt{0,84^2 + 7,91^2} = 7,95 \text{ А}$$

[по (9.128)]

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{cm} + P_{mex} + P_{elx.x}}{mU_{1hom}} = \frac{369,5 + 117 + 66,6}{3 \cdot 220} = 0,84 \text{ А}$$

где по (9.219)

$$P_{elx.x} \approx 3 I_\mu^2 r_1 = 3 \cdot 7,91^2 \cdot 0,355 = 66,6 \text{ Вт};$$

по (9.221)

$$\cos \varphi_{x.x} = I_{x.x.a} / I_{x.x} = 0,84 / 7,95 = 0,11$$

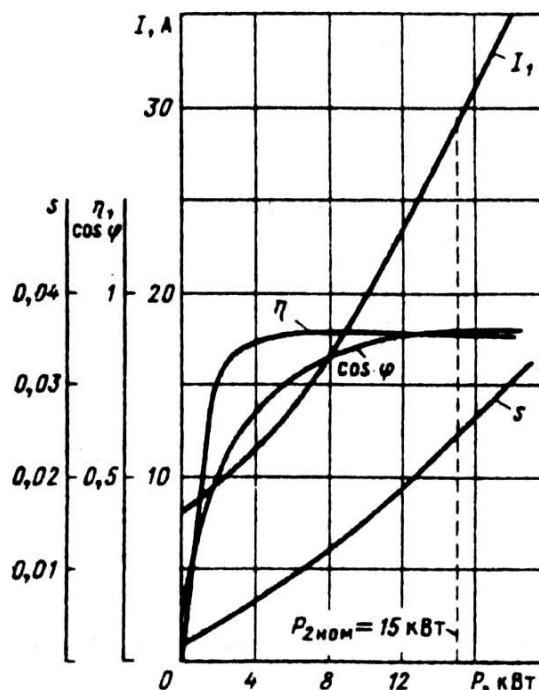


Рис 9.74. Рабочие характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_{2hom} = 15 \text{ кВт}$, $2p = 4$, $U_{hom} = 220/380 \text{ В}$, $I_h = 28,4 \text{ А}$, $\cos \varphi_{hom} = 0,894$; $\eta_{hom} = 0,892$, $S_{hom} = 0,024$)

Расчет рабочих характеристик

55. Параметры

по (9.184)

$$r_{12} = \frac{P_{cm.osn}}{mI_\mu^2} = \frac{276,4}{3 \cdot 7,91^2} = 1,47 \text{ Ом};$$

по (9.185)

$$x_{12} = \frac{U_{1hom}}{I_\mu} - x_1 = \frac{290}{7,91} - 0,673 = 27,14 \text{ Ом};$$

по (9.223)

$$C_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,673}{27,14} = 1,025$$

используем приближенную формулу, так как $|y| < 1^\circ$:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} = \frac{0,335 \cdot 27,14 - 1,47 \cdot 0,673}{1,47 \cdot (0,355 + 1,47) + 27,14(0,673 + 27,14)} = \operatorname{arctg} 0,01 \text{ рад} = |34'| < 1^\circ$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода: по (9.226)

$$I_{0a} = \frac{P_{CT.OCH} + 3I_\mu^2 r_1}{3U_{1HOM}} = \frac{276,4 + 3 \cdot 7,91^2 \cdot 0,355}{3 \cdot 220} = 0,52 \text{ A}$$

по (9.227)

$$a' = c_1^2 = 1,025^2 = 1,051; b' = 0;$$

$$a = c_1 r_1 = 1,025 \cdot 0,355 = 0,364 \text{ Ом};$$

$$b = c_1(x_1 + c_1 x_2') = 1,025(0,673 + 1,025 \cdot 0,912) = 1,648 \text{ Ом}.$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения,

$$P_{CT} + P_{MEX} = 369,5 + 117 = 487 \approx 0,49 \text{ кВт}.$$

56. Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений $s = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03$, принимая предварительно, что $s_{HOM} \approx r_2' = 0,025$. Результаты расчета сведены в табл. 9.36. После построения рабочих характеристик (рис. 9.74) уточняем значение номинального скольжения: $s_{HOM} = 0,024$.

Расчет рабочих характеристик см. § 9.12.

Номинальные данные спроектированного двигателя:

$$P_{2HOM} = 15 \text{ кВт}, U_{1HOM} = 220/380 \text{ В}, I_{1HOM} = 28,4 \text{ А}, \cos \varphi_{HOM} = 0,894, \eta_{HOM} = 0,892.$$

Таблица 9.36. Рабочие характеристики асинхронного двигателя (см. табл. 9.30)

$$P_{HOM} = 15 \text{ кВт}; 2p = 4; U_{1HOM} = 220/380 \text{ В}; I_{0a} = 0,52 \text{ А};$$

$$I_{0p} \approx I_\mu = 7,91 \text{ А}; P_{CT} + P_{TR.PH} + P_{MEX} = 0,49 \text{ кВт};$$

$$r_1 = 0,355 \text{ Ом}; r_2' = 0,186 \text{ Ом}; c_1 = 1,025;$$

$$a' = 1,051; a = 0,364 \text{ Ом}; b' = 0 \text{ Ом}; b = 1,65 \text{ Ом}$$

№ п/п	Расчетная формула	Раз- мер- ность	Скольжение s						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	S _{HOM} = = 0,024
1	$a' r_2' / s'$	Ом	39,1	19,55	13,03	9,77	7,82	6,52	8,15
2	$R = a + a' r_2' / s$	Ом	39,46	19,91	13,39	10,13	8,81	6,88	8,51
3	$X = b + b' r_2' / s$	Ом	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	39,49	19,98	13,49	10,26	8,34	7,08	8,67
5	$I_2 = U_{1HOM} / Z$	А	5,57	11,011	16,31	21,44	26,38	31,07	25,37
6	$\cos \varphi_2' = R / Z$	-	6,999	0,996	0,993	0,987	0,981	0,972	0,982
7	$\sin \varphi_2' = X / Z$	-	0,042	0,083	0,122	0,161	0,198	0,233	0,19
8	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos \varphi_2'$	А	6,08	11,49	16,72	21,68	26,4	30,72	25,43
9	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin \varphi_2'$	А	8,14	8,82	9,9	11,36	13,13	15,15	12,73
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	10,16	14,48	19,43	24,28	29,48	34,25	28,44
11	$I_2' = c_1 I_2''$	А	5,71	11,29	16,72	21,98	27,04	31,85	26
12	$P_1 = 3 U_{1HOM} I_{1a} 10^{-3}$	кВт	4,01	7,58	11,03	14,31	17,42	20,28	16,78

13	$P_{\text{з1}} = 3 I_1^2 r_1 10^{-3}$	кВт	0,11	0,223	0,402	0,638	0,926	1,25	0,861
14	$P_{\text{з2}} = 3 (I_1')^2 r_2' 10^{-3}$	кВт	0,018	0,071	0,156	0,27	0,408	0,566	0,377
15	$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$	кВт	0,034	0,048	0,064	0,081	0,097	0,113	0,084
16	$\Sigma P = P_{\text{ср}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ}} + P_{\text{з1}} + P_{\text{з2}} + P_{\text{з.щ}} + P_{\text{доб}}$	кВт	0,652	0,832	1,112	1,479	1,921	2,418	1,812
17	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	3,36	6,75	9,92	12,83	15,5	17,86	14,97
18	$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0,838	0,891	0,899	0,897	0,89	0,881	0,892
19	$\cos \varphi = I_{1a}/I_1$	-	0,598	0,794	0,861	0,886	0,896	0,897	0,894

Расчет пусковых характеристик

a) Расчет токов с учетом влияния изменения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учета влияния насыщения от полей рассеяния)

Расчет проводится по формулам табл. 9.32 в целях определения токов в пусковых режимах для дальнейшего учета влияния насыщения на пусковые характеристики двигателя. При отсутствии необходимости учитывать влияние насыщения от полей рассеяния расчет пусковых характеристик проводится аналогично, включая последние пункты формуляра (см. табл. 9.32). Подробный расчет приведен для $s = 1$. Данные расчета остальных точек сведены в табл. 9.37.

Таблица 9.37. Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока (см. табл. 9. 32)

$$P_{2\text{ном}} = 15 \text{ кВт}; U_{1\text{ном}} = 220/380 \text{ В}; 2p = 4; I_{1\text{ном}} = 28,4 \text{ А}; \\ I'_{2\text{ном}} = 26 \text{ А}; x_1 = 0,673 \text{ Ом}; x'_2 = 0,912 \text{ Ом}; x_{12\pi} = 39,62 \text{ Ом}; \\ c_{1\pi} = 1,017; r_1 = 0,355 \text{ Ом}; r'_2 = 0,186 \text{ Ом}; s_{\text{ном}} = 0,024$$

№ п/п	Расчетная формула	Раз- мер- ность	Скольжение s						
			1	0,8	0,5	0,2	0,1		
1	$\xi = 6361 h_c \sqrt{s}$ (9.245)	-	1,81	1,63	1,28	0,81	0,57	-	
2	$\varphi = \varphi(\xi)$	-	0,66	0,45	0,19	0,04	0,01	-	
3	$h_r = h_c / (1 + \varphi)$	мм	17,2	19,7	23,9	28,5	28,5	28,5	
4	$k_r = q_c / q_r$	-	1,46	1,3	1,12	1	1	1	
5	$K_R = 1 + \frac{r_c'}{r_2'} (k_r - 1)$	-	1,32	1,21	1,08	1	1	1	
6	$r_{2\xi}' = K_R r_2'$	Ом	0,246	0,225	0,2	0,186	0,186	0,186	
7	$k_\delta = \varphi'(\xi)$	-	0,81	0,86	0,93	0,97	0,99	0,98	
8	$\lambda_{\pi 2\xi} = \lambda_{\pi 2} - \Delta \lambda_{\pi 2\xi}$	-	2,33	2,4	2,49	2,54	2,57	2,55	
9	$K_x = \sum \lambda_{2\xi} / \sum \lambda_2$	-	0,95	0,97	0,98	0,99	1	1	
10	$x_{2\xi}' = K_x x_2'$	Ом	0,866	0,885	0,894	0,903	0,912	0,908	

11	$R_n = r_1 + C_{1n} \frac{r'_{2\xi}}{S}$	Ом	0,605	0,641	0,762	1,3	2,25	1,7
12	$X_n = x_1 + C_{1n} x'_{2\xi}$	Ом	1,55	1,57	1,58	1,59	1,6	1,6
13	$I'_{2n} = U_{nom} / \sqrt{R_n^2 + X_n^2}$	А	132,2	129,7	125,4	107,1	79,7	94,2
14	$I_{1n} = I'_{2n} \sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2} / (C_{1n} x_{12})$	А	135,1	132,6	128,2	109,6	81,7	96,8

57. Активное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока [$v_{расч} = 115^\circ\text{C}$, $p_{115} = 10^{-6}/20,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $b_c/b_n = 1$; $f_1 = 50 \text{ Гц}$];
по рис. 9.73 $h_c = h_n - (h_{ш} + h'_{ш}) = 29,5 - (0,7 + 0,3) = 28,5 \text{ мм}$;

$$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_n} \frac{f_2}{p_v} 10^{-7}} = 63,61 h_c \sqrt{s} = 63,61 \cdot 0,0285 = 1,81;$$

по рис. 9.57 для $\xi = 1,81$; = 1,81 находим $\varphi = 0,66$;

по (9.246)

$$h_r = h_c / (1+\varphi) = 0,0285 / (1+0,66) = 0,1772 \text{ м} = 17,2 \text{ мм};$$

по (9.253), так как $(0,5 \cdot 7,9) < 17,2 < (22,4 + 0,5 \cdot 7,9)$ (см. рис. 9.73)

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \frac{\pi \cdot 7,9^2}{8} + \frac{7,9 + 5,71}{2} (17,2 - 0,5 \cdot 7,9) = 114,7 \text{ мм}^2,$$

где

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 7,9 - \frac{7,9 - 4,2}{22,4} (17,2 - 5 \cdot 7,9) = 5,71 \text{ мм};$$

по (9.247)

$$k_r = q_c/q_r = 167/114,7 = 1,46$$

(q_c - по п. 33 расчета);

по (9.257)

$$K_r = 1 + \frac{r'_c}{r_2} (k_r - 1) = 1 + \frac{40,89 \cdot 10^{-6} (1,46 - 1)}{59,37 \cdot 10^{-6}} = 1,32$$

(по п. 45 расчета $r'_c = r_c = 40,89 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$; $r_2 = 59,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$). Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$$r'_{2\xi} = K_r r'_2 = 1,32 \cdot 0,186 = 0,246 \text{ Ом}.$$

58. Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока по рис. 9.58 для $\xi = 1,81$ (см. п. 57 расчета) $\varphi' = k_d = 0,81$; по табл. 9.27, рис. 9.52, а, жс (см. также п. 47 расчета) и по (9.262)

$$K_x = \frac{\lambda_{\pi 2\xi} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{d 2}}{\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{d 2}} = \frac{2,33 + 0,59 + 2,09}{2,58 + 0,59 + 2,09} = 0,59$$

где

по п. 47 расчета $\lambda_{\pi 2\xi} = \lambda_{\pi 2} - \Delta \lambda_{\pi 2\xi} = 2,58 - 0,25 = 2,33$,

$$\Delta \lambda_{\pi 2\xi} = \lambda'_{\pi 2} (1 - k_d) = \left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{uu}}{2b_1} \right] (1 - k_d) = \left[\frac{24,08}{3 \cdot 7,9} \left(1 - \frac{7,9^2}{8 \cdot 167} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,9} \right] (1 - 0,81) = 0,25$$

по (9.261) — см. также п. 47 расчета

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 0,912 \cdot 0,95 = 0,866 \text{ Ом}.$$

59. Пусковые параметры по (9.277) и (9.278)

$$x_{12n} = k_\mu x_{12} = 1,46 \cdot 27,14 = 39,62 \text{ Ом};$$

$$c_{12n} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}} = 1 + \frac{0,673}{39,62} = 1,017$$

60. Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

по (9.280) для $s = 1$

$$R_n = r_1 + c_{1n} r'_2 / s = 0,355 + 1,017 \cdot 0,246 = 0,605 \text{ Ом};$$

$$X_n = x_1 + c_{1n} x'_2 = 0,673 + 1,017 \cdot 0,866 = 1,55 \text{ Ом};$$

по (9.281)

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,605^2 + 1,55^2}} = 132,2 \text{ А};$$

по (9.283)

$$I_{1n} = I'_{2n} \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}}{c_{1n} x_{12n}} = 132,2 \frac{\sqrt{0,605^2 + (1,55 + 39,62)^2}}{1,017 \cdot 39,62} = 135,1 \text{ А.}$$

Расчет пусковых характеристик с учетом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

Расчет проводим для точек характеристик, соответствующих $s = 1; 0,8; 0,5; 0,1$, при этом используем значения токов и сопротивлений для тех же скольжений с учетом влияния вытеснения тока (см. табл. 9.37).

Данные расчета сведены в табл. 9.38. Подробный расчет приведен для $s = 1$.

Таблица 9.38. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния (см. табл. 9.33)

$$\begin{aligned} P_{2\text{ном}} &= 15 \text{ кВт}; U_1 = 220/380 \text{ В}; 2p = 4; I_{1\text{ном}} = 28,4 \text{ А}; I'_{2\text{ном}} = 26 \text{ А}; \\ x_1 &= 0,67 \text{ Ом}; x'_2 = 0,912 \text{ Ом}; x_{12n} = 39,62 \text{ Ом}; r_1 = 0,355 \text{ Ом}; \\ r'_2 &= 0,186 \text{ Ом}; s_{\text{ном}} = 0,024; C_N = 0,978 \end{aligned}$$

№ п/п	Расчетная формула	Раз- мер- ность	Скольжение s					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{kp} = 0,14$
1	$k_{\text{нас}}$	—	1,35	1,3	1,2	1,1	1,05	1,08
2	$F_{n,cp} = 0,7 \frac{I_1 k_{\text{нас}} U_n}{a} (k'_\beta + k_{\gamma_1} k_{OB1} \frac{Z_1}{Z_2})$	A	3668	3467	3094	2422	1725	2102
3	$B_{\Phi\delta} = F_{n,cp} 10^{-6} / (1,6 \delta C_N)$	Tл	4,69	4,43	3,95	3,1	2,21	2,69
4	$k_\delta = f(B_{\Phi\delta})$	—	0,5	0,53	0,61	0,72	0,84	0,79
5	$c_1 = (t_{z1} - b_{m1})(1 - k_\delta)$	мм	4,2	3,95	3,28	2,35	1,34	1,76
6	$\lambda_{n1\text{нас}} = \lambda_{n1} - \Delta \lambda_{n1\text{нас}}$	—	1,17	1,18	1,2	1,25	1,31	1,28
7	$\lambda_{D1} = k_\delta \lambda_{D1}$	—	0,87	0,92	1,06	1,25	1,46	1,37
8	$x_{1\text{нас}} = x_1 \sum \lambda_{1\text{нас}} / \sum \lambda_1$	Ом	0,505	0,514	0,538	0,574	0,615	0,597
9	$c_{1n} = 1 + x_{1\text{нас}} / x_{12n}$	—	1,013	1,013	1,014	1,014	1,016	1,015
10	$c_2 = (t_{z2} - b_{m2})(1 - k_\delta)$	мм	6,85	6,44	5,34	3,84	2,19	2,88
11	$\lambda_{n2\text{нас}} = \lambda_{n2\xi} - \Delta \lambda_{n2\text{нас}}$	—	1,78	1,86	1,96	2,06	2,17	2,11
12	$\lambda_{D2} = k_\delta \lambda_{D2}$	—	1,05	1,11	1,27	1,5	1,76	1,65
13	$x'_{2\xi\text{нас}} = x'_2 \sum \lambda_{2\xi\text{нас}} / \sum \lambda_2$	Ом	0,593	0,617	0,662	0,72	0,787	0,754
14	$R_{n,\text{нас}} = r_1 + c_{1n,\text{нас}} r'_{2\xi} / s$	Ом	0,6	0,64	0,76	1,3	2,24	1,7
15	$X_{n,\text{нас}} = x_{1\text{нас}} + c_{1n,\text{нас}} x'_{2\xi\text{нас}}$	Ом	1,11	1,14	1,21	1,3	1,41	1,36
16	$I'_{2\text{нас}} = U_1 / \sqrt{R_{n,HAC}^2 + X_{n,HAC}^2}$	A	174,4	168,3	153,9	119,7	83,1	101,1

17	$I_{1\text{has}} = I'_{2\text{has}} \frac{\sqrt{R_{II,HAC}^2 + (X_{II,HAC} + x_{12II})^2}}{C_{II,HAC} x_{12II}}$	A	177	170,9	156,4	122	84,6	103,1
18	$k'_{\text{has}} = I_{1\text{has}} / I_{1\text{п}} \text{ (сравнить с принятым в п.1 k_{has})}$	—	1,31	1,29	1,22	1,11	1,04	1,07
19	$I_{1*} = I_{1\text{has}} / I_{1\text{ном}}$	—	6,2	6	5,5	4,3	3	3,6
20	$M_* = \left(\frac{I'_{2HAC}}{I'_{2HOM}} \right)^2 K_R \frac{S_{HOM}}{S}$	—	1,43	1,52	1,82	2,54	2,45	2,59

61. Индуктивные сопротивления обмоток. Принимаем $k_{\text{has}} = 1,35$:

по (9.263)

$$F_{II,CP} = 0,7 \frac{k_{\text{has}} I_1 u_{nl}}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} k_{o61} \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 0,7 \frac{135,1 \bullet 1,35 \bullet 13}{1} \left(1 + 0,958 \frac{48}{38} \right) = 3668 \text{ A}$$

по (9.265)

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,5}{12,1 + 15,2}} = 0,968;$$

по (9.264)

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n,ep}}{1,6\delta C_N} 10^{-6} = \frac{3668 \bullet 10^{-6}}{1,6 \bullet 0,5 \bullet 10^{-3} \bullet 0,978} = 4,69 \text{ Тл}$$

По рис. 9.61 для $B_{\phi\delta} = 4,69$ Тл находим $k_\delta = 0,5$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

по (9.266)

$$c_{\vartheta 1} = (t_{z1} - b_{w1})(1 - k_\delta) = (12,1 - 3,7)(1 - 0,5) = 4,2;$$

по (9.269)

$$\Delta \lambda_{II,HAC} = \frac{h_{II} + 0,58 h_k}{b_{w1}} \frac{c_{\vartheta 1}}{c_{\vartheta 1} + 1,5 b_{w1}} = \frac{1 + 0,58 \bullet 1,95}{4,7} \frac{4,2}{4,2 + 1,5 \bullet 3,7} = 0,25$$

$$[h_k = \frac{b_1 - b_{w1}}{2} = \frac{7,6 - 3,7}{2} = 1,95 \text{ мм (см. рис. 9.73)}];$$

по (9.272)

$$\lambda_{\pi1\text{has}} = \lambda_\pi - \Delta \lambda_{\pi1\text{has}} = 1,42 - 0,25 = 1,18.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения по (9.274)

$$\lambda_{D1\text{has}} = \lambda_{D1} k_\delta = 1,74 \bullet 0,5 = 0,87.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения по (9.275)

$$x_{1HAC} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1HAC}}{\sum \lambda_1} = 0,673 \frac{1,18 + 1,34 + 0,87}{1,42 + 1,34 + 1,74} = 0,505 \text{ Ом}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока:

по (9.271) (см. п. 47 и 58 расчета)

$$\Delta \lambda_{II,2HAC} = \frac{h_{II}}{b_{w1}} \frac{c_{\vartheta 2}}{b_{w1} + c_{\vartheta 2}} = \frac{1}{1,5} \frac{6,85}{6,85 + 1,5} = 0,55$$

где по (9.270)

$$c_{\vartheta 2} = (t_2 - b_{\text{ш}})(1 - k_{\delta}) = (15,2 - 1,5)(1 - 0,5) = 6,85$$

(для закрытых пазов ротора $h_{\text{ш}2} = h'_{\text{ш}} + h_{\text{ш}} = 0,3 + 0,7 = 1 \text{ мм}$);

по (9.273)

$$\lambda_{\text{п2нас}} = \lambda_{\text{п2}\xi} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 2,33 - 0,55 = 1,78.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения по (9.274)

$$\lambda_{\text{Д2нас}} = \lambda_{\text{Д2}} k_{\delta} = 2,09 \cdot 0,5 = 1,05.$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения по (9.276)

$$x'_{2\xi HAC} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi HAC}}{\sum \lambda_2} = 0,912 \frac{1,78 + 1,05 + 0,59}{2,58 + 2,09 + 0,59} = 0,593 \text{ Ом};$$

по (9.278)

$$c_{1\Pi} = 1 + \frac{x_{1HAC}}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{0,505}{39,62} = 1,013$$

здесь $x_{12\Pi}$ по (9.277).

62. Расчет токов и моментов:

по (9.280)

$$R_{\text{п.нас}} = r_1 + c_{1\Pi, \text{нас}} \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0,355 + 1,013 \cdot 0,246 = 0,604 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{п.нас}} = X_{1\Pi, \text{нас}} + c_{1\Pi, \text{нас}} x'_{2\xi, \text{нас}} = 0,505 + 1,013 \cdot 0,593 = 1,11 \text{ Ом};$$

по (9.281)

$$I'_{2HAC} = \frac{U_{1HOM}}{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + X_{\text{п.нас}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,604^2 + 1,11^2}} = 174,1 \text{ А}$$

по (9.283)

$$I_{1HAC} = I'_{2HAC} \frac{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + (X_{\text{п.нас}} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi, \text{нас}} x_{12\Pi}} = 174,1 \frac{\sqrt{0,604^2 + (1,11 + 39,62)^2}}{1,013 \cdot 39,62} = 176,7 \text{ А};$$

Кратность пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения

$$I_{\Pi^*} = \frac{I_{1\Pi, \text{нас}}}{I_{1HOM}} = \frac{176,7}{28,4} = 6,2$$

Кратность пускового момента с учетом влияния вытеснения тока и насыщения по (9.284)

$$M_{\Pi^*} = \left(\frac{I'_{2\Pi, \text{нас}}}{I'_{2HOM}} \right)^2 K_R \frac{s_{HOM}}{s} = \left(\frac{174,1}{26} \right)^2 1,32 \cdot 0,24 = 1,43$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения

$$k'_{HAC} = \frac{I_{1\Pi, \text{нас}}}{I_{1\Pi}} = \frac{177}{135,1} = 1,31$$

отличается от принятого $k_{\text{нас}} = 1,35$ менее чем на 3 %.

Для расчета других точек характеристики задаемся $k_{\text{нас}}$, уменьшенным в зависимости от тока I_1 (см. табл. 9.37);

принимаем при

$$s = 0,8 \quad k_{\text{нас}} = 1,3;$$

$$s = 0,5 \quad k_{\text{нас}} = 1,2;$$

$$s = 0,2 \quad k_{\text{нас}} = 1,1;$$

$$s = 0,1 \quad k_{\text{нас}} = 1,05.$$

Данные расчета сведены в табл. 9.38, а пусковые характеристики представлены на рис. 9.75.

63. Критическое скольжение определяем после расчета всех точек пусковых характеристик (табл. 9.38) по средним значениям сопротивлений $x_{1\text{HAC}}$ и $x'_{2\xi\text{HAC}}$, соответствующим скольжениям $s = 0,2 \dots 0,1$:
по (9.286)

$$S_{KP} = \frac{r'_{2\xi}}{x_{1HAC}' / C_{1P.HAC} + x'_{2\xi HAC}} = \frac{0,186}{0,59 / 1,015 + 0,713} = 0,14,$$

после чего рассчитываем кратность максимального момента: $M_{*\text{max}} = 2,59$ (см. табл. 9.38).

Спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ как по энергетическим показателям (КПД и $\cos \phi$), так и по пусковым характеристикам.

Тепловой расчет

64. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя по (9.315)

$$\Delta v_{\text{пов1}} = K \frac{P'_{\vartheta, \text{п1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0,2 \frac{348 + 276}{0,185 \cdot 0,14 \cdot 108} = 44,62 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

[по табл. 9.35 $K = 0,2$; по (9.313) $P'_{\vartheta, \text{п1}} = k_p P_{\vartheta 1} \frac{2l_1}{l_{CP1}} = 1,07 \cdot 861 \cdot 2 \cdot 0,14 / 0,742 = 348 \text{ Вт}$, где из табл. 9.36 для $s = s_{\text{ном}}$ находим $P_{\vartheta 1} = 861 \text{ Вт}$; по рис. 9.67, б $a_1 = 108 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $k_p = 1,07$]

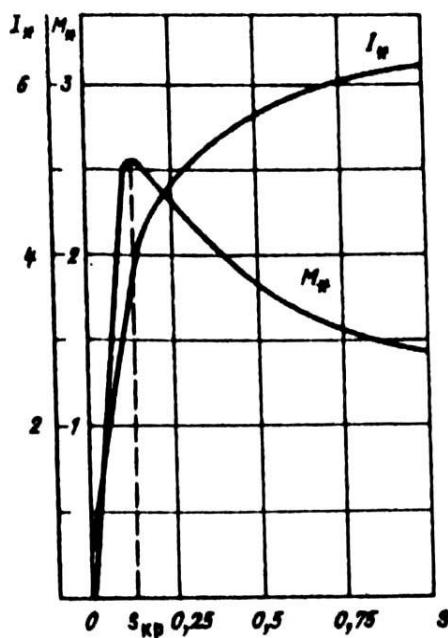


Рис. 9.75. Пусковые характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_2 = 15 \text{ кВт}$, $2p=4$, $U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$, $M_{\text{п*}} = 1,43$, $I_{\text{п*}} = 6,2$, $M_{\text{max}} = 2,59$)

65. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора по (9.316)

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{из.п1}} = \frac{P'_{\text{э.п1}}}{Z_1 \prod_{\text{п1}} l_1} \left(\frac{b_{\text{из1}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right) = \frac{348}{48 \cdot 0,054 \cdot 0,14} \left(\frac{0,4}{0,16} + \frac{7,6+10}{1,6 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 3,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

[по (9.317) $\Pi_{\text{п1}} = 2h_{\text{пк}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 18,3 + 10 + 7,6 = 54,2 \text{ мм} = 0,054 \text{ м};$ для изоляции класса нагревостойкости $F\lambda'_{\text{ЭКВ}} = 0,16 \text{ Вт/м}^2,$ по рис. 9.69 для $d/d_{\text{из}} = 1,5/1,585 = 0,95$ находим $\lambda'_{\text{ЭКВ}} = 1,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {^\circ}\text{C)}]$.

66. Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей по (9.319)

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{э.л1}}}{2Z_1 \prod_{\text{л1}} l_{\text{л1}}} \left(\frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{h_{\text{л1}}}{12 \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right) = \frac{574}{2 \cdot 48 \cdot 0,054 \cdot 0,23} \left(\frac{0,05}{0,16} + \frac{18,3}{12 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 0,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

[по (9.314)]

$$P'_{\text{э.л1}} = k_p P_{\text{э1}} \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{CP1}}} = 1,07 \cdot 861 \frac{2 \cdot 0,231}{0,742} = 574 \text{ Вт};$$

$\Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{п1}} = 0,742 \text{ м}; b_{\text{из.л1 max}} = 0,05 \text{ мм}].$

67. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя по (9.320)

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{пов.л1}} = \frac{K P'_{\text{э.л1}}}{2\pi D l_{\text{выл1}} \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 574}{2\pi \cdot 0,185 \cdot 74,8 \cdot 10^{-3} \cdot 108} = 12,23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

68. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя по (9.321)

$$\Delta \mathcal{G}'_1 = [(\Delta \mathcal{G}_{\text{пов1}} + \Delta \mathcal{G}_{\text{из.п1}}) 2l_1 + (\Delta \mathcal{G}_{\text{из.л1}} + \Delta \mathcal{G}_{\text{пов.л1}}) 2l_{\text{л1}}] / l_{\text{CP1}} = [(44,62 + 3,15) \cdot 2 \cdot 0,14 + (0,67 + 12,23) \cdot 2 \cdot 0,23] / 0,742 = 26,02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

69. Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды по (9.322)

$$\Delta \mathcal{G}_B = \sum P'_B / (S_{\text{КОР}} \alpha_B) = 1293 / (0,99 \cdot 20) = 65,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

[по (9.326)]

$$\sum P'_B = \sum P' - (1 - K)(P'_{\text{э.п1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9P_{\text{мех}} = 1897 - (1 - 0,2)(348+276) - 0,9 \cdot 117 = 1293 \text{ Вт, где по (9.324)}$$

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) = 1812 + (1,07 - 1)(861 + 377) = 1897 \text{ Вт;}$$

$\sum P = 1812 \text{ Вт}$ из табл. 9.36 для $s = s_{\text{ном}}$; по (9.327) $S_{\text{кор}} = (\pi D_a + 8\Pi_p)(l_1 + 2l_{\text{выл1}}) = (\pi 0,272 + 8 \cdot 0,32)(0,14 + 2 \cdot 0,0748) = 0,99 \text{ м}^2$, где по рис. 9.70 $\Pi_p = 0,32 \text{ м}$ для $h = 160 \text{ мм};$ по рис. 9.67, б $a_B = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {^\circ}\text{C)}$ для $D_a = 0,272 \text{ м}].$

70. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды по (9.328)

$$\Delta \mathcal{G}_1 = \Delta \mathcal{G}'_1 + \Delta \mathcal{G}_B = 26,02 + 65,3 = 91,32 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

71. Проверка условий охлаждения двигателя.

Требуемый для охлаждения расход воздуха по (9.340)

$$Q_B = \frac{k_m \sum P'_B}{1100 \Delta v_B} = \frac{5,05 \cdot 1897}{1100 \cdot 65,3} = 0,13 \text{ м}^3/\text{с}$$

[по (9.341)]

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n}{100} D_a} = 2,5 \sqrt{\frac{1500}{100} 0,272} = 5,05$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (9.342)

$$Q'_B = 0,6 D_a^3 \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,272^3 \frac{1500}{100} = 0,18 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах.

Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

Вывод: спроектированный двигатель отвечает поставленным в техническом задании требованиям.

9.16.2. Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором

Техническое задание

Спроектировать трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором: $P_2 = 132 \text{ кВт}$; $U = 380/660 \text{ В}$; $2p = 6$; конструктивное исполнение IM1001; исполнение по способу защиты IP23; способ охлаждения IC01; климатическое исполнение и категория размещения УЗ; класс нагревостойкости изоляции F.

Выбор главных размеров

1. По рис. 9.18, б принимаем $h = 315 \text{ мм}$; по табл. 9.8 находим для данной оси вращения $D_a = 590 \text{ мм} = 0,59 \text{ м}$.

2. По (9.2)

$$D = K_D D_a = 0,72 \cdot 0,59 = 0,425 \text{ м}$$

(по табл. 9.9 для $2p = 6$ находим $K_D = 0,72$).

3. По (9.4)

$$P' = mIE = P_2 \frac{P_2}{\eta \cos \varphi} = 132 \frac{0,98}{0,92 \cdot 0,88} = 159,8 \text{ кВт}$$

($k_E = 0,98$ — по рис. 9.20; $\eta = 0,92$; $\cos \varphi = 0,88$ — по рис. 9.21, в).

4. По (9.6)

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{o61} A B_\delta} = \frac{159,8 \cdot 10^3}{0,425^2 \cdot 104,7 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 51 \cdot 10^3 \cdot 0,84} = 0,193 \approx 0,19 \text{ м};$$

5. По (9.5)

$$\Omega = 2\pi \frac{f}{p} = 2\pi \frac{50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

по рис. 9.23, 6 $A = 51 \cdot 103 \text{ А/м}$; $B_\delta = 0,84 \text{ Тл}$; принимаем предварительно $k_{o61} = 0,92$.

6.

$$\lambda = l_\delta / \tau = 0,19 / 0,2225 = 0,85.$$

Окончательно принимаем

$$D_a = 0,59 \text{ м}; D = 0,425 \text{ м}; l_1 = l_\delta = 0,19 \text{ м}.$$

Расчет зубцовой зоны и обмотки статора

7. По (9.16)

$$Z_{1\min} \div Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{Z1\max}} \div \frac{\pi D}{t_{Z1\min}} = \frac{\pi 425}{22} \div \frac{\pi 425}{17} = 60,7 \div 78,5$$

(по табл. 9.11 зубцовое деление при прямоугольных полуоткрытых пазах статора $t_{Z1} = 17 \dots 22 \text{ мм}$).

8. Принимаем

$$Z_1 = 72; q_1 = Z_1 / (2pm) = 72 / (6 \cdot 3) = 4;$$

$$t_{Z1} = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi 0,425}{72} = 18,54 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 18,54 \text{ мм}.$$

9. По (9.17)

$$u'_n = \frac{\pi D A}{I_{1HOM} Z_1} = \frac{\pi 0,425 \cdot 51 \cdot 10^3}{143 \cdot 72} = 6,61$$

по (9.18)

$$I_{1HOM} = \frac{P_2}{m U_{1HOM} \cos \varphi \eta} = \frac{132000}{3 \cdot 380 \cdot 0,92 \cdot 0,88} = 143 \text{ A};$$

по (9.19)

$$u_n = a u'_n = 3 \cdot 6,61 = 19,83.$$

Принимаем $a = 3$; $u_n = 20$.

10. По (9.20)

$$W_1 = \frac{U_n Z_1}{2am} = \frac{20 \cdot 72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 80$$

11. По (9.21)

$$A = \frac{2 I_{1HOM} W_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 143 \cdot 80 \cdot 3}{\pi \cdot 0,425} = 54,41 \cdot 10^3 \text{ A/m}$$

$$12. k_{ob} = k_{p1} k_{y1} = 0,958 \cdot 0,966 = 0,925$$

по табл. 3.16 для $q = 4k_{p1} = 0,958$; по (3.11)

$$k_{y1} = \sin \left(\frac{\pi}{2} \beta \right) = \sin \left(\frac{\pi}{2} 0,833 \right) = 0,966,$$

где $\beta = y/\tau = 10/12 = 0,833$; $\tau = Z_1/2p = 72/6 = 12$.

13. По (9.22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{1HOM}}{4k_B W_1 k_{ob} f_1} = \frac{0,98 \cdot 380}{4,44 \cdot 80 \cdot 0,95 \cdot 50} = 22,67 \cdot 10^{-3} \text{ Вб},$$

где $k_E = 0,98$ — по рис. 9.20.

14. По (9.23)

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{D l_\delta} = \frac{3 \cdot 22,67 \cdot 10^{-3}}{0,425 \cdot 0,19} = 0,842 \text{ Тл.}$$

15. По (9.24)

$$q_{\phi_1} = \frac{I_{1HOM}}{a J_1} = \frac{143}{3 \cdot 5,06 \cdot 10^6} = 9,42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 9,42 \text{ мм}^2;$$

$$J_1 = \frac{A J_1}{A} = \frac{260 \cdot 10^9}{51,4 \cdot 10^3} = 5,06 \text{ А/м}^2$$

где по рис. 9.27, $d(AJ_1) = 260 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^2$

Обмотку выполняем из подразделенных катушек; провод прямоугольный; $n_{el} = 2$.

Предварительно

$$q_{el} = q_{\phi_1}/n_{el} = 9,42/2 = 4,71 \text{ мм}^2$$

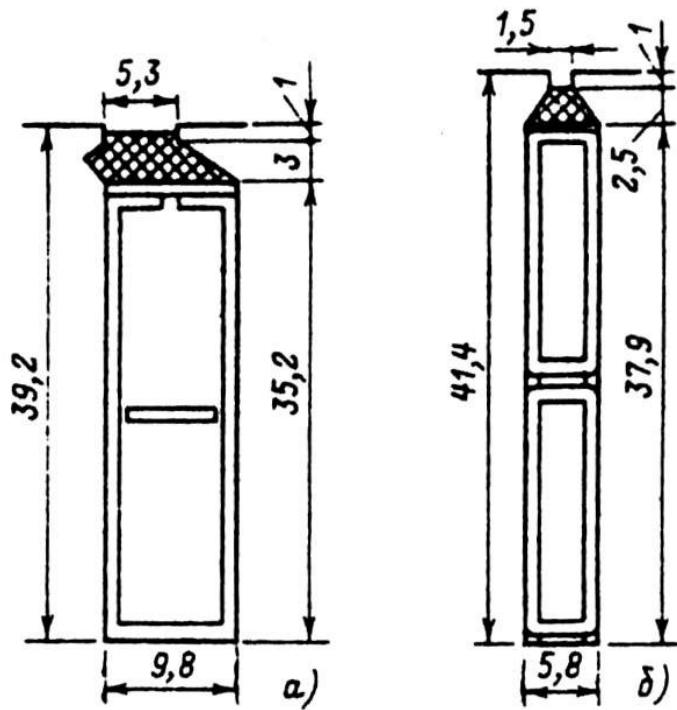


Рис. 9.76. Пазы спроектированного двигателя с фазным ротором
($P_2 = 132 \text{ кВт}$, $2p = 6$, $U_{\text{ном}} = 380/660 \text{ В}$)

16. По (9.29)

$$b_{Z1\min} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1\max} l_{CT1} k_{c1}} = \frac{0,842 \cdot 18,54 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{1,9 \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 8,65 \text{ мм}$$

(по табл. 9.12 $B_{Z\max} = 1,9 \text{ Тл}$; по табл. 9.13 $k_{c1} = 0,95$).

17. Предварительно

$$b_n = t_{Z1} - b_{Z1\min} = 18,54 - 8,65 = 9,89 \text{ мм};$$

по (9.35)

$$b'_{\text{эл}} = 0,5(b_n - \Delta_{\text{из}}) = 0,5(b_n - 2b_{\text{из}} - \Delta b_n) = 0,5(9,89 - 2 \cdot 1,1 - 0,3) = 3,7 \text{ мм}$$

(по табл. 3.9 $b_{\text{из}} = 1,1 \text{ мм}$; по табл. 9.14 $\Delta b_n = 0,3 \text{ мм}$).

18. По табл. П 3.2 выбираем провод ПЭТП-155 $\frac{1,4x3,55}{1,52x3,67} q_{\text{эл}} = 4,755 \text{ мм}^2$;

$$q_{\text{эф1}} = q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} = 4,755 \cdot 2 = 9,51 \text{ мм}^2.$$

19. Ориентируясь на табл. 3.9, составляем таблицу заполнения паза статора (табл. 9.39).

Размеры паза в штампе (рис. 9.76, а) принимаем с учетом припусков Δb_n и Δh_n по (9.36).

20. По (9.27) уточняем

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a Q_{\text{эф}}} = \frac{143}{3 \cdot 9,51 \cdot 10^{-6}} = 5,01 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Таблица 9.39 Заполнение паза статора

Наименование	Размер, мм	
	по ширине паза	по высоте паза
Обмоточный провод изолированный 1,52x3,67	3,67 x 2 = 7,34	1,52x20 = 30,4
Пазовая изоляция и допуск на укладку	2,2	4,5
Всего на паз без клина	9,54	34,9

21. По рис. 9.31 $\delta = 0,9$ мм.
 22. $D_2 = D - 2\delta = 0,425 - 2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} = 0,4232$ м.
 23. Принимаем $l_2 = l_1 = 0,19$ м.
 24. Обмотку ротора выполняем стержневой волновой с $q_2 = 4 \frac{1}{2}$ тогда $Z_2 = 2 p_2 m_2 q_2 = 2 \cdot 3 \cdot 4,5 = 81$.

$$25. t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,4232}{81} = 16,44 \cdot 10^{-3} = 16,44 \text{ мм}$$

26. По (9.55)

$$w_2 = 2 p_2 q_2 = 6 \cdot 4,5 = 27.$$

27. Напряжение на контактных кольцах ротора при соединении обмотки ротора в звезду по (9.56)

$$U_{k,k} = \sqrt{3} U_{1,\text{ном}} = 222,1 \approx 220 \text{ В.}$$

28. По (9.57)

$$I_2 = k_i I_1 v_i = 0,904 \cdot 143 \cdot 2,87 = 371 \text{ А}$$

[по (9.58) $k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,88 = 0,904$];

по (9.59)

$$v_i = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} = \frac{3 \cdot 80 \cdot 0,925}{3 \cdot 27 \cdot 0,955} = 2,87,$$

где по (3.20)

$$k_{o62} = k_{p2} = \frac{0,5}{N \sin\left(\frac{\pi}{2mN}\right)} = \frac{0,5}{9 \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 9}\right)} = 0,955$$

при $q = 4 \frac{1}{2}$; $N = 2 \cdot 4 + 1 = 9$ (см. гл. 3).

29. По (9.60)

$$q_{\phi 2} = I_2 / J_2 = 371 / (5,7 \cdot 10^6) = 65,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 65,1 \text{ мм}^2,$$

принимаем $J_2 = 5,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

30. Предварительно $b_{n2} = 0,35$ $t_{z2} = 0,35 \cdot 16,41 = 5,74$ мм, $b_{3l2} = b_{n2} - 2b_{iz} - \Delta b_n = 5,74 - 1,7 - 0,3 = 3,74$ мм [2 $b_{iz} = 1,7$ мм по табл. 3.11, $\Delta b_n = 0,3$ мм по табл. 9.12]. По табл. П 3.2 выбираем неизолированный провод с $a = 3,8$ мм, $b = 16,8$ мм, $q_{\phi 2} = 63,36 \text{ мм}^2$.

31. Уточняем J_2

$$J_2 = I_2 / q_{\phi 2} = 371 / (63,36 \cdot 10^{-6}) = 5,86 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

32. Ориентируясь на табл. 3.11, составляем таблицу заполнения паза ротора (табл. 9.40). Размеры паза в штампе (рис. 9.76, 6) принимаем с учетом припусков Δb_n и Δh_n (см. табл. 9.12).

Таблица 9.40. Заполнение паза ротора

Наименование	Размеры на паз, мм	
	по ширине	по высоте
Стержни обмотки — неизолированная медь $3,8 \times 16,8$	3,8	$16,8 \times 2 = 33,6$
Пазовая изоляция и допуск на укладку	1,7	4
Всего на паз без клина	5,5	37,6

33. По (9.102)

$$D_B = k_B D_a = 0,23 \cdot 0,59 = 0,136 \text{ м}$$

(по табл. 9.19 для $h = 315$ мм и $2p = 6$ $k_B = 0,23$). Принимаем $D_B = D_j = 0,14$ м. В роторе выполняем 12 аксиальных каналов; $d_{k2} = 30$ мм, $m_{k2} = 1$.

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод двигателя выполняем из стали марки 2312.

34. Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.103)

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta k_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,842 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1,21 = 1458 \text{ А}$$

по (4.19) $k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,183 \cdot 1,023 = 1,21$, где по (4.17) и (4.18)

где

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta} = \frac{18,54}{18,54 - 3,18 \cdot 0,9} = 1,183,$$

где

$$\gamma_1 = \frac{(b_{III}/\delta)^2}{5 + b_{III}/\delta} = \frac{(5,3/0,9)^2}{5 + 5,3/0,9} = 3,18;$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_2 \delta} = \frac{16,41}{16,41 - 0,417 \cdot 0,9} = 1,023,$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{III}/\delta)^2}{5 + b_{III}/\delta} = \frac{(1,5/0,9)^2}{5 + 1,5/0,9} = 0,417.$$

35. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (9.104)

$$F_{z1} = 2h_{z1} H_{z1} = 2 \cdot 39,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1514 = 118,7 \text{ А},$$

где для паза по рис. 9.28, б $h_{z1} = h_\pi = 39,2$ (рис. 9.76, а);

по (9.105)

$$B_{Z1max} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{B_{z1max} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0,842 \cdot 18,54 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{9,09 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 1,81 \text{ Тл};$$

$$B_{Z1min} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{B_{z1max} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0,842 \cdot 18,54 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{12,16 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 1,35 \text{ Тл},$$

где по табл. 9.15 (рис. 9.76, а и 9.28, б)

$$b_{Z1min} = \frac{\pi[D + 2(h_{III} + h_K)]}{Z_1} - b_\pi = \pi \frac{0,425 + 2(3+1) \cdot 10^{-3}}{72} - 9,8 \cdot 10^{-3} = 9,09 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 9,09 \text{ мм};$$

$$b_{Z1max} = \frac{\pi(D + 2h_\pi)}{Z_1} - b_\pi = \pi \frac{0,425 + 2 \cdot 39,2 \cdot 10^{-3}}{72} - 9,8 \cdot 10^{-3} = 12,16 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 12,16 \text{ мм};$$

$$B_{Z1cp} = \frac{B_{Z1max} + B_{Z1min}}{2} = \frac{1,81 + 1,35}{2} = 1,58 \text{ Тл.}$$

Напряженность поля в сечениях зубца по табл. П 1.10:

$$H_{z1max} = 2800 \text{ А/м для } B_{z1max} = 1,81 \text{ Тл};$$

$$H_{z1cp} = 1370 \text{ А/м для } B_{z1cp} = 1,58 \text{ Тл};$$

$$H_{z1min} = 804 \text{ А/м для } B_{z1min} = 1,35 \text{ Тл.}$$

Средняя напряженность поля

$$H_{z1} = \frac{1}{6} (H_{z1max} + 4 H_{z1cp} + H_{z1min}) = \frac{1}{6} (2800 + 4 \cdot 1370 + 804) = 1514 \text{ А.}$$

36. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора [по (9.108)]

$$F_{z2} = 2h_{z2} H_{z2} = 2 \cdot 41,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2285 = 189,2 \text{ А},$$

по табл. 9.20 (см. рис. 9.32, б и 9.76, б)

$$h_{z2} = h_{\pi 2} = 41,4 \text{ мм};$$

по (9.109)

$$b_{z2\max} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{III} - h_K)}{Z_2} - b_{II2} = \pi \frac{0,4232 - 2(1 + 2,5) \cdot 10^{-3}}{81} - 5,8 \cdot 10^{-3} = 10,34 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_{z2\min} = \pi \frac{D_2 - 2h_{II2}}{Z_2} - b_{II2} = \pi \frac{(423,2 - 2 \cdot 41,4) \cdot 10^{-3}}{81} - 5,8 \cdot 10^{-3} = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

по (9.109)

$$B_{z2\max} = \frac{B_\delta t_{z2} l_\delta}{B_{z1\max} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0,842 \cdot 16,41 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{7,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 1,97 \text{ Тл};$$

$$B_{z2\max} = \frac{B_\delta t_{z2} l_\delta}{B_{z2\max} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0,842 \cdot 16,41 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{10,34 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 1,41 \text{ Тл},$$

$$B_{z2cp} = \frac{B_{z2\max} + B_{z2\min}}{2} = \frac{1,97 + 1,41}{2} = 1,69 \text{ Тл.}$$

Так как $B_{z2\max} = 1,97 > 1,8$ Тл, необходимо учесть вытеснение потока в паз в сечении зубца.

По (4.33)

$$k_\pi = \frac{b_{II2} l_\delta}{b_{z\min} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{5,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{7,4 \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 0,83$$

Примем действительную индукцию $B_{z2\max} = 1,96$ Тл, соответствующая ей напряженность (по табл. П 1.10) $H_{z2\max} = 5430$ А. Подставим полученные значения в уравнение (4.32):

$$B_{z2\max} = B'_{z2\max} - \mu_0 H_{z2\max} k_\pi;$$

$$B_{z2\max} = 1,97 - 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5430 \cdot 0,83 = 1,96.$$

Действительная индукция в зубце $B_{z2\max} = 1,96$ Тл.

По табл. П 1.10

$$H_{z2\max} = 5430 \text{ А/м для } B_{z2\max} = 1,96 \text{ Тл};$$

$$H_{z2cp} = 1840 \text{ А/м для } B_{z2cp} = 1,69 \text{ Тл};$$

$$H_{z2\min} = 917 \text{ А/м для } B_{z2\min} = 1,41 \text{ Тл.}$$

Расчетная напряженность поля

$$H_{z2} = \frac{1}{6} (H_{z2\max} + 4 H_{z2cp} + H_{z2\min}) = \frac{1}{6} (5430 + 4 \cdot 1840 + 917) = 2285 \text{ А/м.}$$

37. Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$k_Z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{119 + 189}{1459} = 1,21$$

38. Магнитное напряжение ярма статора по (9.116)

$$F_a = L_a H_a = 0,286 \cdot 763 = 218,2 \text{ А,}$$

где по (9.119)

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} = \pi \frac{0,59 - 0,0433}{6} = 0,286 \text{ м;}$$

[по (9.120)]

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{I1} = \frac{0,59 - 0,425}{2} - 39,2 \cdot 10^{-3} = 43,3 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

по табл. П 1.9 для

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_{CT1} k_{C1}} = \frac{22,67 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 43,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 1,45 \text{ Тл,}$$

где $h'_a = h_a = 43,3 \cdot 10^{-3}$ м, находим $H_a = 763 \text{ А/м}].$

39. Магнитное напряжение ярма ротора по (9.121)

$$F_j = L_j H_j = 0,126 \cdot 186 = 23,4 \text{ А,}$$

где по (9. 127)

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2P} = \frac{\pi(0,14 + 0,1)}{6} = 0,126 \text{ м};$$

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} = \frac{0,4232 - 0,14}{2} - 41,4 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ м};$$

по (9.122)

$$B_j = \frac{\Phi}{2h_j l_{CT2} k_{c2}} = \frac{22,67 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 80,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 0,78 \text{ Тл};$$

по (9.123)

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} - \frac{2}{3} d_{k2} m_{k2} = \frac{0,4232 - 0,14}{2} - 41,4 \cdot 10^{-3} - \frac{2}{3} 0,03 = 80,2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

по табл. П 1.9 для $B_j = 0,78$ Тл находим $H_j = 186$ А/м.

40. Магнитное напряжение цепи на два полюса по (9.128)

$$F_{\Pi} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 145,8 + 119 + 189 + 218 + 23 = 2007 \text{ А.}$$

41. Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя по (9.129)

$$k_{\mu} = F_{\Pi} / F_{\delta} = 2007 / 1458 = 1,38.$$

42. Намагничивающий ток по (9.130)

$$I_{\mu} = \frac{p F_{\Pi}}{0,9 m_1 w_1 k_{OB1}} = \frac{3 \cdot 2007}{0,9 \cdot 3 \cdot 80 \cdot 0,925} = 30,1 \text{ А};$$

по (9.131)

$$I_{\mu^*} = I_{\mu} / I_{\text{ном}} = 30,1 / 143 = 0,21.$$

Расчет параметров

43. Активное сопротивление обмотки статора по (9.132)

$$r_1 = k_R \rho_v \frac{L_1}{q_{\phi 1} a} = \frac{10^{-6} \cdot 84,5}{41 \cdot 9,51 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 0,0722 \text{ Ом},$$

где

$$K_R = 1;$$

$$\rho_{115} = 10^{-6} / 41 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$q_{\phi 1} = 9,51 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ (см. п. 18 расчета);}$$

$$a = 3;$$

$$L_1 = w_1 l_{cp1} = 80 \cdot 1,056 = 84,5 \text{ м};$$

$$l_{cp1} = 2(l_{n1} + l_{l1}) = 2(0,19 + 0,338) = 1,056 \text{ м}; l_{n1} = 0,19 \text{ м};$$

$$l_{l1} = K_l b_{kt} + 2B + h_n = 1,23 \cdot 0,202 + 2 \cdot 0,025 + 0,0392 = 0,338 \text{ м},$$

где по (9.138)

$$b_{kt1} = \frac{\pi(D + h_m)}{2p} \beta = \frac{\pi(0,425 + 0,0392)}{6} = 0,833 = 0,202 \text{ м};$$

по (9.142)

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,58^2}} = 1,23;$$

по (9.144)

$$m = \frac{b + s}{t_{z1}} = \frac{7,34 + 3,5}{18,54} = 0,58;$$

(b + s) — расстояние между осями соседних катушек статора в лобовых частях (см. рис. 9.49):

$$b = 2b_{\phi} = 2 \cdot 3,67 = 7,34 \text{ мм};$$

$$s = 3,5 \text{ мм по табл. 9.24.}$$

44. Вылет лобовых частей обмотки статора по (9.140)

$l_{\text{выл}} = K_{\text{л}} b_{\text{кт}} + B + 0,5 h_{\text{n}} = 0,36 \cdot 0,202 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,039 = 0,117 \text{ мм},$
где по (9.143)

$$K_{\text{выл}} = 0,5 K_{\text{л}} m = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 0,58 = 0,36$$

($b_{\text{кт}1}$, $K_{\text{л}}$ и m — по п. 43 расчета; B — из табл. 9.24; $h_{\text{n}1}$ — по рис. 9.76, а).

45. Активное сопротивление обмотки ротора по (9.132)

$$r_2 = K_R \rho_v \frac{L}{q_{\phi_2} a_2} = \frac{10^{-6} \cdot 27,5}{41 \cdot 63,36 \cdot 10^{-6}} = 0,0106 \text{ Ом},$$

где

$$K_R = 1$$

$$q_{\phi_2} = 63,36 \text{ мм}^2 \text{ (см. п. 30 расчета);}$$

$$L_2 = w_2 l_{\text{cp}2} = 27 \cdot 1,02 = 27,5 \text{ м};$$

$$l_{\text{cp}2} = 2(l_{\text{n}2} + l_{\text{п}2}) = 2(0,19 + 0,32) = 1,02 \text{ м};$$

$$l_{\text{n}2} = 0,19;$$

по (9.145)

$$l_{\text{п}2} = K_{\text{п}2} b_{\text{кт}} + 2B_c = 1,1 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,05 = 0,32 \text{ м},$$

где по (9.148)

$$m = \frac{b_{ct} + S_{ct}}{t_{z2}} = \frac{3,8 + 1,7}{13,2} = 0,42;$$

$b_{ct} = 3,8$ — по п. 30 расчета; $S_{ct} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — по табл. 9.25;

по (9.142)

$$K_z = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0,42^2}} = 1,1;$$

$$B_c = 0,05;$$

по (9.147)

$$b_{kt2} = \frac{\pi(D_2 - h_{n2})}{2p} = \frac{\pi(0,4232 - 0,414)}{6} = 0,2 \text{ м}.$$

По (9.150)

$$r'_2 = v_{12} r_2 = 8,24 \cdot 0,0106 = 0,0873 \text{ Ом},$$

где по (9.151)

$$v_{12} = \frac{m_1(w_1 k_{OB1})^2}{m_2(w_2 k_{OB2})^2} = \frac{3(80 \cdot 0,925)^2}{3(27 \cdot 0,955)^2} = 8,24;$$

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}} = \frac{0,0873 \cdot 143}{380} = 0,033.$$

46. Вылет лобовых частей обмотки ротора по (9.146)

$$l_{\text{выл}} = l_{\text{выл}} = K_{\text{л}} b_{\text{кт}} + B_c = 0,23 \cdot 0,2 + 0,05 = 0,096 \text{ м},$$

где по (9.143)

$$K_{\text{выл}} = 0,5 K_{\text{л}} m = 0,5 \cdot 1,1 \cdot 0,42 = 0,23$$

($b_{\text{кт}2}$, B_c , $K_{\text{л}2}$ и m — по п. 45 расчета).

Индуктивное сопротивление обмотки статора

47. По табл. 9.26 и рис. 9.50, б

$$\lambda_{n2} = \frac{h_2 - h_0}{3b_n} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_n} + \frac{3h_K}{b_n + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_\beta + \frac{h_0}{4b_n} = \frac{33,8 - 1,4}{3 \cdot 9,8} 0,906 + \left(\frac{0,7}{9,8} + \frac{3 \cdot 3}{9,8 + 2 \cdot 5,3} + \frac{1}{5,3} \right) 0,875 + \frac{1,4}{4 \cdot 9,8} =$$

$$= 1,65;$$

по рис. 9.76, а с учетом данных табл. 3.9

$$h_0 = 1 + \frac{0,2 + 0,6}{2} = 1,4 \text{ мм};$$

$$h_k = 3 \text{ мм}; h_1 = 0,5 + \frac{0,2 + 0,6}{4} = 0,7 \text{ мм};$$

$h_2 = 35,2 - 2 \cdot 0,7 = 33,8 \text{ мм}; h_{III} = 1 \text{ мм}; b_{III} = 5,3 \text{ мм}; b_{II} = 9,8 \text{ мм};$
по (9.156)

$$k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,833) = 0,875;$$

по (9.158)

$$k_\beta = 0,25(1 + 3 k'_\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906.$$

48. По (9.159)

$$\lambda_{II} = 0,34 \frac{q}{l_s} (l_{II} - 0,64 \beta \tau) = 0,34 \frac{4}{0,19} (0,038 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 0,2225) = 1,57$$

0,19

($l_{II} = 0,338 \text{ м}$ — по п. 43 расчета; $l'_\delta = 0,19 \text{ м}$).

49. По (9.160)

$$\lambda_{I\!I\!I} = \frac{t_z}{12\delta k_\delta} \xi = \frac{18,54}{12 \cdot 0,9 \cdot 1,21} 0,855 = 1,21$$

где по (9. 162)

$\xi = 2 + 0,022 q^2 - k^2_{ob}(1 + \Delta z) = 0,0034 \cdot 4^2 + 2 \cdot 0,875 - 0,925^2 (1 + 0,11) = 0,855$
($k'' = 0,0034$ — по рис. 9.51, в; $\Delta z = 0,11$ — по рис. 9.51, а для $b_{III}/\delta = 5,3/0,9 = 5,89$ и $b_{III}/t_{z1} = 5,3/18,54 = 0,29$; k'_β — по п. 47 расчета).

50. По (9.152)

$$x_1 = 1,58 \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \frac{l'_s}{p_1 q_1} (\lambda_{II} + \lambda_{II\!I} + \lambda_{I\!I\!I}) = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{80}{100} \right)^2 \frac{0,19}{3 \cdot 4} (1,65 + 1,57 + 1,21) = 0,355.$$

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1HOM}}{U_{1HOM}} = 0,555 \frac{143}{380} = 0,134.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора

51. По табл. 9.26 и рис. 9.50, ж:

$$\lambda_{II\!I\!I} = \frac{h_2 - h_0}{3b_{II}} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_{II}} + \frac{3h_k}{b_{II} + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_\beta + \frac{h_0}{4b_{II}} = \frac{35,5 - 1,6}{3 \cdot 5,8} + \frac{1,2}{5,8} + \frac{3 \cdot 2,5}{5,8 + 2 \cdot 1,5} + \frac{1}{1,5} + \frac{1,6}{4 \cdot 5,8} = 3,74$$

(по рис. 9.76, б с учетом данных табл. 3.11: $h_0 = 0,5 + 2,2/2 = 1,6 \text{ мм}$; $h_k = 2,5 \text{ мм}$; $h_1 = 0,5 + 2,2/4 + 0,15 = 1,2 \text{ мм}$; $h_2 = 37,9 - 2 \cdot 1,2 = 35,5 \text{ мм}$; $h_{III} = 1 \text{ мм}$; $b_{III} = 1,5 \text{ мм}$; $b_{II} = 5,8 \text{ мм}$; $k_\beta - k'_\beta = 1$).

52. По (9.159) коэффициент лобового рассеяния

$$\lambda_{II} = 0,34 \frac{q}{l_s} (l_{II} - 0,64 \beta \tau) = 0,34 \frac{4,5}{0,19} (0,32 - 0,64 \cdot 0,2225) = 1,43$$

($l_{II\!I} = 0,32$ — по п. 45 расчета).

53. По (9.160) коэффициент дифференциального рассеяния

$$\lambda_{I\!I\!I\!I} = \frac{t_{z2}}{12\delta k_\delta} \xi = \frac{16,41}{12 \cdot 0,9 \cdot 1,31} 1,46 = 1,83,$$

где по (9.163) для $q_2 = 4 \frac{1}{2}$

$$\xi = k'' q_2^2 + 2k''_\beta - k^2_{ob} \left(\frac{1}{d^2} + \Delta z \right) = 0,0215 \cdot 4,5^2 + 2 \cdot 0,63 - 0,955^2 \left(\frac{1}{2^2} + 0,01 \right) = 1,46$$

($k''_\beta = 0,0215$ — по рис. 9.51, в для $\beta = 1$; $\Delta z = 0,01$ — по рис. 9.51, а для $b_{III}/\delta = 1,5/0,9 = 1,67$ и $b_{III}/t_{z2} = 1,5/16,41 = 0,09$; $k''_\beta = 0,63$ — по рис. 9.51, г для $c/d = 1/2$ и $\beta = 1$).

54. Индуктивное сопротивление обмотки ротора по (9.174)

$$x_2 = 1,58 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{p_2 q_2} (\lambda_{n2} + \lambda_{\pi2} + \lambda_{d2}) = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{27}{100} \right)^2 \frac{0,19}{3 \bullet 4,5} (3,74 + 1,43 + 1,83) = 0,057 \text{ Ом}$$

$$x'_2 = x_2 v_{12} = 0,057 \bullet 8,24 = 0,47,$$

где $v_{12} = 8,24$ из п. 45 расчета;

$$x'_{2*} = x'_2 I_{1\text{ном}} / U_{1\text{ном}} = 0,47 \bullet 143/380 = 0,177.$$

Расчет потерь

55. По (9.187)

$$P_{ct.osн} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 (k_{da} B_a^2 m_a + k_{dz} B_{cp}^2 m_{z1}) = 1,75 (1,6 \bullet 1,45^2 \bullet 104,7 + 1,8 \bullet 1,58^2 \bullet 422) = 948,2 \text{ Вт}$$

[из табл. 9.26 для стали марки 2312 $p_{1,0/50} = 1,75$ Вт/кг; $k_{da} = 1,6$; $k_{dz} = 1,8$;

по (9.188)

$$m_a = \pi(D_a - h_a) h_a l_{ct1} k_{c1} \gamma_c = \pi(0,59 - 0,0433) \bullet 0,0433 \bullet 0,19 \bullet 0,95 \bullet 7,8 \bullet 10^3 = 104,7 \text{ кг}, \\ h_a = 0,0433 \text{ м из п. 38 расчета};$$

по (9.189)

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{ct1} k_{c1} \gamma_c = 72 \bullet 0,0392 \bullet 10,63 \bullet 10^{-3} \bullet 0,19 \bullet 0,95 \bullet 7,8 \bullet 10^3 = 42,2 \text{ кг},$$

где

$$b_{z1cp} = \frac{b_{z1\max} + b_{z1\min}}{2} = \frac{12,16 + 9,09}{2} = 10,63 \text{ мм};$$

из п. 35 и 38 расчета $B_a = 1,45$ Тл, $B_{z1cp} = 1,58$ Тл].

56. По (9.194)

$$P_{пov2} = p_{пov2}(t_{z2} - b_{ш2})Z_2 l_{ct2} = 647,7(16,41 - 1,5) \bullet 10^{-3} \bullet 81 \bullet 0,19 = 154,8 \text{ Вт},$$

где по (9.192)

$$= 0,5 - 1,8''5 (0,336 - 18,54)2 = 674,$$

$$P_{пov2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{0,2} t_{z1} \bullet 10^3)^2 = 0,5 \bullet 1,8 \left(\frac{72 \bullet 1000}{10000} \right)^{1,5} (0,336 \bullet 18,54)^2 = 674,7 \text{ Вт/м}^2$$

[по (9.190) $B_{02} = \beta_{02} k_\delta B_\delta = 0,33 \bullet 1,21 \bullet 0,842 = 0,336$ Тл; по рис. 9.53, б для $b_{ш1}/\delta = 5,3/0,9 = 5,9$ находим $\beta_{02} = 0,33$].

57. По (9.200)

$$P_{пул2} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{n_{пул2}} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{72 \bullet 1000}{1000} 0,147 \right)^2 41,88 = 516,1 \text{ Вт}$$

[по (9.201)]

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2cp} l_{ct2} k_{c2} \gamma_c = 81 \bullet 41,4 \bullet 10^{-3} \bullet 0,00887 \bullet 0,19 \bullet 0,95 \bullet 7,8 \bullet 10^3 = 41,88 \text{ кг},$$

где

$$b_{z2cp} = \frac{b_{z2\max} + b_{z2\min}}{2} = \frac{10,34 + 7,42}{2} = 8,87 \text{ мм};$$

по (9.196)

$$B_{пул2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2 t_{z2}} B_{z2cp} = \frac{3,18 \bullet 0,9 \bullet 10^{-3}}{2 \bullet 16,41 \bullet 10^{-3}} 1,69 = 0,147 \text{ Тл},$$

где $\gamma_1 = 3,18$ из п. 34 расчета; $B_{z2cp} = 1,69$ из п. 36 расчета].

58. По (9.202)

$$P_{ct.доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} = 154,8 + 516,1 = 670,9 \text{ Вт},$$

по (9.203)

$$P_{ct} = P_{ct.osн} + P_{ct.доб} = 948,2 + 670,9 = 1619,1 \text{ Вт}.$$

59. По (9.211)

$$P_{мех} = 1,2 \bullet 2 p \tau^3 (n_k + 1,1) \bullet 10^3 = 1,2 \bullet 6 \bullet 0,2225^3 \bullet 11 \bullet 10^3 = 872,4 \text{ Вт}.$$

60. По (9.214)

$$P_{\text{тр.щ}} = K_{\text{тр}} \rho_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_k = 0,16 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 10,47 = 201 \text{ Вт}$$

(по табл. П 4.2 выбираем щетки МГ, для которых $\rho_{\text{щ}} = 20 \cdot 103 \text{ Па}$, $J_{\text{щ.доп}} = 20 \text{ А/см}^2$, $v_{k,\text{доп}} = 20 \text{ м/с}$; $\Delta U_{\text{щ}} = 0,2 \text{ В}$, $K_{\text{тр}} = 0,16$).

61. Площадь щеток на одно кольцо

$$S'_{\text{щ}} = I_2 / J_{\text{щ}} = 371 / 20 = 18,55 \text{ см}^2;$$

по табл. П 4.1 принимаем $l_{\text{щ}} = 25 \text{ мм}$, $b_{\text{щ}} = 20 \text{ мм}$; число щеток на одно кольцо

$$n_{\text{щ}} = \frac{S'_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}} l_{\text{щ}}} = \frac{18,55}{2,5 \cdot 2} = 3,71 \approx 4$$

Уточняем плотность тока под щеткой:

$$J_{\text{щ}} = \frac{I_2}{b_{\text{щ}} l_{\text{щ}} n_{\text{щ}}} = \frac{371}{2,5 \cdot 2 \cdot 4} = 18,55 \text{ А/см}^2$$

Принимаем диаметр кольца $D_k = 0,2 \text{ м}$, тогда линейная скорость кольца

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,2 \cdot 1000}{60} = 10,47 \text{ м/с.}$$

62. Сумма потерь

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ}} = 1,619 + 0,872 + 0,201 = 2,69 \text{ кВт.}$$

Холостой ход

63. По (9.217)

$$I_{x.x} = \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{x.x.p}^2} = \sqrt{2,54^2 + 30,1^2} = 30,2 \text{ А}$$

[$I_{x.x.p} = I_{\mu} = 30,1 \text{ А}$ — из п. 42 расчета;

по (9.218)

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1x.x}}}{m U_{1\text{ном}}} = \frac{(2,69 + 0,2) \cdot 10^3}{3 \cdot 380} = 2,54 \text{ А}$$

где $P_{\text{э1x.x}} = 3 I_{\mu}^2 r_1 = 3 \cdot 30,1^2 \cdot 0,0722 = 196,2 \text{ Вт} = 0,2 \text{ кВт}$

$(r_1 = 0,0722 \text{ из п.43 расчета})]$

64. По (9.221)

$$\cos \varphi_{x.x} = I_{x.x.a} / I_{x.x} = 2,54 / 30,2 = 0,084.$$

65. По (9.184)

$$r_{12} = P_{\text{ст.осн}} / (m I_{\mu}^2) = \frac{948,2}{3 \cdot 30,1^2} = 0,349 \text{ Ом};$$

$$r_{12*} = r_{12} I_{1\text{ном}} / U_{1\text{ном}} = 0,349 \cdot 143 / 380 = 0,131.$$

66. По (9.185)

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}} - I_{\mu} x_1}{I_{\mu}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} - x_1 = 380 / 30,1 \cdot 0,353 = 12,27 \text{ Ом};$$

$$x_{12*} = x_{12} I_{1\text{ном}} / U_{1\text{ном}} = 12,27 \cdot 143 / 380 = 4,6.$$

Расчет рабочих характеристик

67. По (9.223)

$$C_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,355}{12,27} = 1,029.$$

По (9.227)

$a = c_1^2 = 1,029^2 = 1,059$; $b' = 0$; $a = c_1 r_1 = 1,029 \cdot 0,0722 = 0,0743$; $b = c_1(x_1 + c_1 x'_2) = 1,029(0,355 + 1,029 \cdot 0,47) = 0,863$.

По (9.226)

$$I_{0a} = \frac{P_{ct,och} + 3I_\mu^2 r_1}{3U_{1hom}} = \frac{948,2 + 3 \cdot 30,1^2 \cdot 0,0722}{3 \cdot 380} = 1 \text{ A.}$$

Данные расчета рабочих характеристик для скольжении $s = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,03$ и $0,04$ сведены в таблицу 9.41. Номинальное скольжение $s = 0,034$ уточнено после построения характеристик (рис. 9.77).

Номинальные данные спроектированного двигателя: $P_2 = 132 \text{ кВт}$; $U_1 = 380/660 \text{ В}$; $2p = 6$; $\eta = 0,91$; $\cos \varphi = 0,88$.

Для расчета максимального момента определяем критическое скольжение:

$$s_{kp} = \frac{r'_2}{x_1/c_1 + x'_2} = \frac{0,0873}{0,355/1,029 + 0,47} = 0,107;$$

M_{max*} находим по 1—5-й и 11-й строкам табл. 9.41 для $s = s_{kp}$;

$$R = a + a' r'_2/s_{kp} = 0,0743 + 1,059/0,107 = 0,938 \text{ Ом};$$

$$X = b + b' r'_2/s_{kp} = 0,863 \text{ Ом};$$

$$I'_2 = c_1 \frac{U_{1hom}}{\sqrt{R^2 + X^2}} = 1,029 \frac{380}{\sqrt{0,938^2 + 0,863^2}} = 306,8 \text{ А.}$$

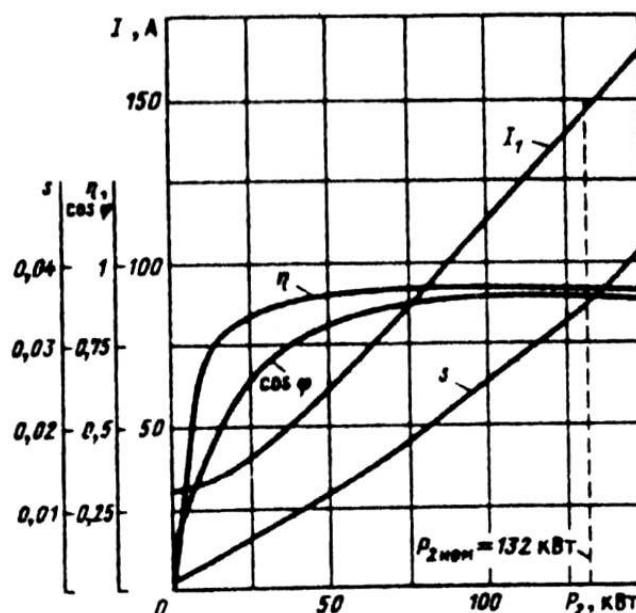


Рис. 9.77. Рабочие характеристики спроектированного двигателя с фазным ротором

($P_{2hom} = 132 \text{ кВт}$, $2p = 6$, $U_{hom} = 380/660 \text{ В}$, $I_{1hom} = 147 \text{ А}$, $\eta_{hom} = 0,9$; $\cos \varphi_{hom} = 0,88$, $s_{hom} = 0,034$)

Т а б л и ц а 9.41. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором

$P_2 = 132 \text{ кВт}$; $U_1 = 380/660 \text{ В}$; $2p = 6$; $r_1 = 0,0722 \text{ Ом}$;
 $r'_2 = 0,0873 \text{ Ом}$; $P_{ct} + P_{meh} + P_{tr.щ} = 2,69 \text{ кВт}$; $I_{0a} = 1 \text{ А}$;
 $I_{0p} = I_\mu = 30,1 \text{ А}$; $c_1 = 1,029$; $a' = 1,059$;
 $a = 0,0726 \text{ Ом}$; $b' = 0$; $b = 0,863 \text{ Ом}$

№	Расчетная формула	Раз-	Скольжение
---	-------------------	------	------------

п/п		мер- ность	0,005	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	S _{hom} = =0,034
1	$a' r'_2 / s'$	Ом	18,5	9,25	6,16	4,62	3,08	2,31	2,72
2	$R = a + a' r'_2 / s$	Ом	18,57	9,32	6,23	4,69	3,15	2,38	2,79
3	$X = b + b' r'_2 / s$	Ом			0,863				
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	18,59	9,36	6,29	4,77	3,27	2,53	2,92
5	$I''_2 = U_{1HOM} / Z$	А	20,44	40,6	60,41	79,66	116,2	150,2	130,1
6	$\cos \varphi'_2 = R / Z$	-	0,999	0,996	0,99	0,983	0,963	0,941	0,955
7	$\sin \varphi'_2 = X / Z$	-	0,046	0,092	0,137	0,181	0,264	0,341	0,296
8	$I_{1a} = I_{0a} + I''_2 \cos \varphi'_2$	А	21,42	41,44	60,81	79,31	112,9	142,3	125,2
9	$I_{1p} = I_{0p} + I''_2 \sin \varphi'_2$	А	31,04	33,84	38,38	44,52	60,78	81,31	68,61
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	37,71	53,50	71,91	90,95	128,2	163,9	142,8
11	$I'_2 = C_1 I''_2$	А	21,03	41,78	62,16	81,97	119,6	154,6	139,9
12	$P_1 = 3 U_{1HOM} I_{1a} 10^{-3}$	кВт	24,42	47,24	69,32	90,41	128,7	162,2	142,7
13	$P_{91} = 3 I_1^2 r_1 10^{-3}$	кВт	0,31	0,62	1,12	1,79	3,56	5,82	4,42
14	$P_{92} = 3 (I_1')^2 r'_2 10^{-3}$	кВт	0,12	0,46	1,01	1,76	3,75	6,26	4,7
15	$P_{9,ш} = 3 \Delta U_{ш} I_2' 10^{-3}$	кВт	0,04	0,07	0,11	0,14	0,21	0,27	0,23
16	$P_{доб} = 0,005 P_1$	кВт	0,12	0,24	0,35	0,45	0,64	0,81	0,71
17	ΣP	кВт	3,28	4,08	5,28	6,83	10,85	15,85	12,75
18	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	21,14	43,16	64,04	83,58	117,9	146,4	130
19	$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0,866	0,914	0,924	0,924	0,916	0,903	0,911
20	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	-	0,568	0,775	0,846	0,87	0,881	0,868	0,877

$$M_{\max*} = \frac{M_{\max}}{M_{hom}} = \left(\frac{I'_2}{I'_{2hom}} \right)^2 \frac{s_{hom}}{s_{kp}} = \left(\frac{306,8}{133,9} \right)^2 \frac{0,034}{0,107} = 1,67.$$

Для более точного определения s_{kp} и M_{\max} следует построить зависимость $M = f(s)$ для диапазона изменения $s = 0,1..1$ и при этом учесть влияние насыщения полями рассеяния головок зубцов на индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора по формулам § 9.13. Последовательность расчета зависимости $M = f(s)$ с учетом влияния насыщения показана в примере расчета асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Вывод: по техническим данным спроектированный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ и технического задания.