

**Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА**

УДК
621.313
У 521



Р. Б. УМАНЦЕВ

**КОНСТРУКЦИИ И РЕМОНТ
КОРОТКОЗАМКНУТЫХ
ОБМОТОК РОТОРОВ
КРУПНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**



Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 447

Р. Б. УМАНЦЕВ

УДК
681.013
У.521

КОНСТРУКЦИИ И РЕМОНТ
КОРОТКОЗАМКНУТЫХ
ОБМОТОК РОТОРОВ
КРУПНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

БАЛАНС

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1976

Центральная научно-
техническая
БИБЛИОТЕКА
Западно-Уральского ЦНТИ

6П2.1.081

У 52

УДК 621.313.13.045

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А., Ларионов В. П.,
Мусаэлян Э. С., Розанов С. П., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д.,
Соколов Б. А., Семенов В. А., Устинов П. И.

Уманцев Р. Б.

У 52 Конструкции и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1976.

80 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 447).

В книге рассмотрены конструкции короткозамкнутых обмоток роторов крупных электродвигателей и даны способы расчета основных параметров. Изложены причины повреждения и технология ремонта короткозамкнутых обмоток на местах установки электродвигателей. Первое издание вышло в 1967 г. Во 2-м издании подробнее описаны способы обнаружения неисправностей короткозамкнутых обмоток, приведены основные технические показатели последней серии крупных двигателей.

Книга предназначена для электрообмотчиков и мастеров, занятых эксплуатацией и ремонтом электрических машин.

У 30307-538
051(01)-76 48-76

6П2.1.081



Издательство «Энергия», 1976 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора является наиболее распространенным видом крупных двигателей, применяемых в настоящее время в народном хозяйстве как в установках промышленных предприятий, так и для собственных нужд электростанций.

Основными преимуществами двигателей с короткозамкнутыми роторами перед двигателями с фазной обмоткой ротора являются:

простота конструкции;

надежность в эксплуатации (благодаря простоте конструкции);

обеспечение более простой возможности изготовления асинхронного многоскоростного двигателя только за счет конструкции обмотки статора, а также более простой возможности реконструкции асинхронного двигателя на месте установки с изменением номинальной частоты вращения путем изменения только обмотки статора;

более надежная работа во взрывоопасных помещениях благодаря отсутствию очага возможного искрообразования — контактных колец и наиболее уязвимых мест электрической машины — электрической изоляции стержней;

работа в подавляющем большинстве с прямым пуском и отсутствием дорогостоящей пусковой аппаратуры.

Основным недостатком асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором по сравнению с двигателями с фазным ротором является невозможность обеспечить большие пусковые моменты, необходимые в приводах с тяжелым и плавным пуском (прокатные установки, приводы некоторых видов в цементной и бумажной промышленности и др.).

Несмотря на относительную простоту и надежность конструкции, случаи выхода из строя короткозамкнутых клеток роторов в эксплуатации довольно часты.

Причинами выхода из строя короткозамкнутых клеток могут явиться как заводские конструктивные или производственные дефекты, так и неправильная эксплуатация двигателей на предприятии.

В брошюре приводятся конструктивные и электрические данные основных серий короткозамкнутых асинхронных двигателей отечественного производства, находящихся в настоящее время в эксплуатации, некоторые конструкции короткозамкнутых роторов двигателей иностранных фирм и характерные виды ремонта и реконструкции короткозамкнутых клеток роторов мощностью от 100 кВт и выше.

Конструкция особо мощных и уникальных короткозамкнутых двигателей, которые устанавливаются в последнее время на электростанциях, с непосредственным водяным охлаждением, работающих в установках блоков 300 МВт, в книге не приведены. Ремонт и модернизация этих двигателей выполняются только специализированными организациями совместно с заводами-изготовителями по специальным проектам.

Наряду с короткозамкнутыми роторами асинхронных двигателей рассматриваются некоторые конструкции и виды ремонтов пусковых клеток роторов крупных синхронных двигателей, которые как по конструкции, так и по причинам повреждения и видам ремонта имеют много общего с обмотками короткозамкнутых роторов.

В книге использованы указания заводов-изготовителей машин и специализированных ремонтных организаций, а также опыт квалифицированных специалистов в области ремонта электрических машин.

Книга также имеет целью познакомить бригадиров и мастеров с основными электрическими параметрами короткозамкнутых обмоток роторов и связью этих параметров с конструктивными особенностями элементов короткозамкнутых обмоток. Эти сведения необходимы для повышения профессионального уровня эксплуатационного и ремонтного персонала и могут быть всегда использованы для решения конкретных задач, связанных с ремонтом двигателей с короткозамкнутыми роторами, а также с определением причин повреждений.

О всех замечаниях просьба сообщать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая, наб., 10, изд-во «Энергия», «Библиотека электромонтера».

Автор

1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ КОРТОКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТК

Короткозамкнутую обмотку ротора, называемую также беличьей клеткой (рис. 1), можно рассматривать как многофазную обмотку, имеющую число фаз, равное числу пазов Z_2 , причем в каждую фазу входит один стержень.

На рис. 2 схематически изображена обмотка ротора в виде беличьей клетки. Здесь показаны токи в стержнях и частях короткозамыкающего кольца, лежащих между серединами соседних стержней. Токи в стержнях $i_1, i_2, i_3 \dots$ должны рассматриваться как линейные, а токи в частях кольца i_{12}, i_{23}, i_{34} — как фазные. Исходя из этого, на рис. 3 построена диаграмма токов в соседних частях кольца I_K и в стержне I_C .

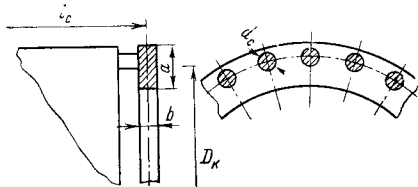


Рис. 1. Элементы короткозамкнутой обмотки.

Определение токов и сопротивлений в элементах беличьей клетки часто бывает необходимо:

- при выяснении причин повреждений обмотки и выборе способа их устранения;

- при замене материала стержней или колец пусковой клетки асинхронных или синхронных роторов в процессе модернизации двигателей для обеспечения необходимых пусковых свойств;

- при переделке роторов с фазной обмоткой в короткозамкнутые.

От значений токов и активных сопротивлений стержней и колец зависит нагрев короткозамкнутой обмотки

и связанные с ним температурные напряжения и деформации в элементах беличьей клетки в период пуска и в рабочем режиме.

Из диаграммы, изображенной на рис. 3, можно определить соотношение токов кольца I_K и стержня I_c :

$$I_K = I_c \frac{1}{2 \sin \frac{\beta}{2}}, \quad (1)$$

где угол сдвига по фазе токов в соседних стержнях и частях кольца (рад)

$$\beta = \frac{2\pi p}{Z_2}. \quad (2)$$

Здесь p — число пар полюсов двигателя; Z_2 — число пазов ротора.

Для определения сопротивлений стержня r_c и соот-

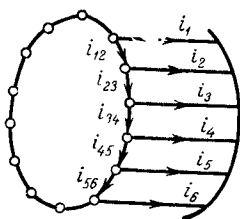


Рис. 2. Схема токов в стержнях и участках короткозамыкающего кольца.

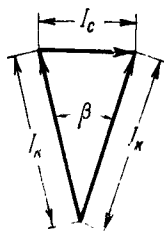


Рис. 3. Диаграмма токов в стержнях и на участках кольца.

ветствующего участка короткозамыкающего кольца r_K , Ом, обратимся к рис. 1 и следующим формулам:

$$r_c = \rho_{15} \frac{l_c 10^{-2}}{S_c}; \quad (3)$$

$$r_K = \rho_{15} \frac{\pi D_K 10^{-2}}{Z_2 S_K}, \quad (4)$$

где l_c — длина стержня (до центров короткозамыкающих колец), см; ρ_{15} — удельное сопротивление материала стержня и кольца при температуре 15°C . Значения удельных сопротивлений для основных материалов, из

которых изготавливаются элементы беличьих клеток, приведены в табл. 1; D_k — средний диаметр короткозамыкающего кольца, см; S_k — площадь сечения кольца, мм²; S_c — сечение стержня, мм².

Для приведения сопротивления обмотки, Ом, к температуре, отличающейся от 15°C, существует формула

$$r_t = r_{15} [1 + \alpha(t - 15)], \quad (5)$$

где t — температура, при которой требуется определить сопротивление; α — температурный коэффициент.

Т а б л и ц а 1

Металлы	r_{15} , Ом·мм ² /м
Медь	0,0175
Алюминий литой	0,035
Латунь обыкновенная (прутковая)	0,07
Латунь марганцовистая	0,107
Бронза фосфористая	0,14
БАЖМ (бронза, имеющая в своем составе алюминий, железо и марганец)	0,185
Сталь	0,14

Примечание. Здесь вместо истинного значения 0,029 дано условное значение 0,035 для учета окисления алюминия и увеличения примеси железа при расплавлении и заливке.

Для различных металлов коэффициент α различен; кроме того, значение коэффициента α зависит от температуры, но для решения большинства практических задач при расчетах электрических машин α во всем диапазоне рабочих температур электрической машины часто принимают для меди, алюминия и бронзы 0,004; для латуни 0,002; для стали 0,006.

Таким образом, сопротивление медной обмотки при температуре 75°C, Ом:

$$r_{75} = r_{15} [1 + 0,004(75 - 15)] = 1,24 r_{15}. \quad (6)$$

Коэффициенты приведения сопротивления медной обмотки при более высоких температурах: при 100°C $r_{100} = 1,34$; при 120°C $r_{120} = 1,42$; при 140°C $r_{140} = 1,54$.

Сопротивление фазы беличьей клетки r_2 , Ом, с учетом приведения схемы токов к эквивалентной много-

фазной звезде определяется по формуле

$$r_2 = r_c + \frac{2r_k}{\Delta^2}, \quad (7)$$

где

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}. \quad (8)$$

Ток стержня I_c , А, равный номинальному току ротора, определяется по формуле

$$I_c = I_{2н} = K_1 I_{1н} \frac{6\omega_1 k_{01}}{Z_2}, \quad (9)$$

где $I_{1н}$ — номинальный фазный ток двигателя (в обмотке статора); K_1 — коэффициент, зависящий от $\cos \varphi$ двигателя, определяется из рис. 4; ω_1 — число эффективных, последовательно соединенных витков в фазе обмотки статора; k_{01} — обмоточный коэффициент обмотки статора, зависящий от числа катушек в катушечной группе (число пазов на полюс и фазу q_1) и укорочения шага β_1 и определяемый формулой

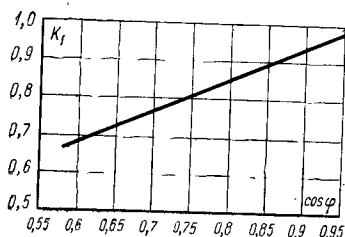


Рис. 4. Определение коэффициента K_1 в зависимости от коэффициента мощности двигателя.

$$k_{01} = \sin(\beta 90^\circ) \frac{0,5}{q_1 \sin \frac{30^\circ}{q_1}}.$$

Для большинства крупных машин q_1 изменяется от 2 до 7 и β от 0,9 до 0,7, чему соответствует изменение k_{01} в пределах 0,954—0,853.

Рассчитанные таким образом сопротивления называют *омическим* сопротивлением *постоянному току* в отличие от *активных* сопротивлений.

Выбор сечения стержней и короткозамыкающих колец производится в зависимости от проходящего тока и допустимой удельной плотности тока для материала стержней и колец.

$$S_c = \frac{I_c}{\Delta_c}, \quad (10)$$

где Δ_c — плотность тока в стержне, А/мм².

Так, например, в зависимости от формы сечения стержня, характера охлаждения двигателя, необходимого пускового момента, для медных стержней можно брать $\Delta_c = 5,5 \div 8 \text{ А/мм}^2$.

Сечение короткозамыкающего кольца, мм^2 :

$$S_K = \frac{I_K}{\Delta_K},$$

где Δ_K — плотность тока в кольце, А/мм^2 .

Исходя из конструктивных соображений, берут $\Delta_K = (0,8 \div 0,65) \Delta_c$.

В дальнейшем изложении при рассмотрении конструкций рабочих и пусковых клеток будут дополнены

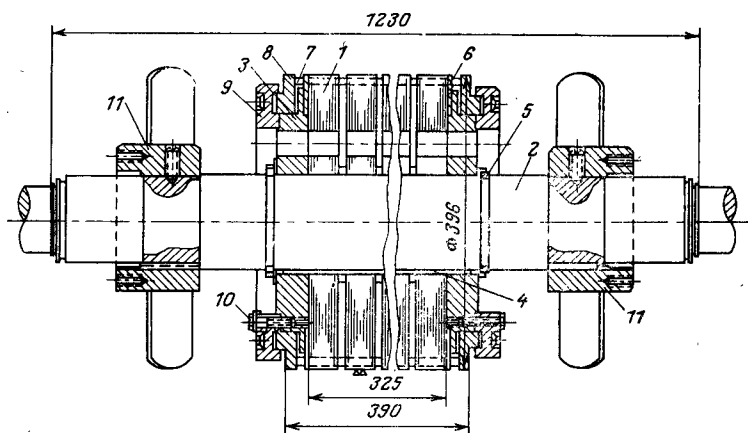


Рис. 5. Ротор асинхронного двигателя типа КАМО 133-2.

рекомендации по выбору сечений стержней и колец, выполняемых из различных материалов.

Пример. Требуется определить токи стержня I_c и кольца I_K , а также омическое сопротивление фазы беличьей клетки $r_{2(75)}$ трехфазного двигателя типа КАМО 133-2 (рис. 5), 290 кВт, 6000 В, 2980 об/мин, если известны: $I_{1H} = 36 \text{ А}$; $\omega_1 = 324$; $k_{01} = 0,91$; $\cos \varphi = 0,87$; $Z_2 = 38$; $D_K = 38 \text{ см}$; $S_c = 154 \text{ мм}^2$; $l_c = 38 \text{ см}$; $S_K = 1600 \text{ мм}^2$.

Омическое сопротивление стержня при температуре 75°C

$$r_{c(75)} = 1,24\rho \frac{l_c \cdot 10^{-2}}{S_c} = 1,24 \cdot 0,0175 \frac{38 \cdot 10^2}{154} = 5,37 \cdot 10^{-5}, \text{ Ом.}$$

Омическое сопротивление участка кольца

$$\begin{aligned} r_{K(75)} &= 1,24\rho \frac{\pi D_K \cdot 10^{-2}}{Z_2 S_K} = \\ &= 1,24 \cdot 0,0175 \frac{3,14 \cdot 38 \cdot 10^{-2}}{38 \cdot 1600} = 0,0425 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Омическое сопротивление фазы беличьей клетки

$$r_2 = r_c + \frac{2r_k}{\Delta^2} = 5,37 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 0,0425 \cdot 10^{-5}}{0,164^2} = 8,53 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

где $\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} = 2 \sin \frac{180^\circ \cdot 1}{38} = 2 \sin 4^\circ 45' = 0,164$.

Ток стержня

$$I_c = I_{2H} = K_1 \frac{6\omega_1 k_{01}}{Z_2} = 0,9 \cdot 36 \frac{6 \cdot 324 \cdot 0,91}{38} = 1190 \text{ А},$$

где $K_1 = 0,9$ при $\cos \varphi = 0,87$ (см. рис. 4).

Ток кольца

$$I_k = I_c \frac{1}{2 \sin \frac{\beta}{2}} = \frac{1190}{2 \cdot 0,082} = 7200 \text{ А},$$

где $\beta = \frac{2\pi p}{Z_2} = \frac{360^\circ \cdot 1}{38} = 9^\circ 30'$; $\frac{\beta}{2} = 4^\circ 45'$; $\sin \frac{\beta}{2} = 0,082$.

Плотность тока в стержне

$$\Delta_c = \frac{I_c}{S_c} = \frac{1190}{154} = 7,73 \text{ А/мм}^2.$$

Плотность тока в короткозамыкающем кольце

$$\Delta_k = \frac{I_k}{S_k} = \frac{7200}{1600} = 4,5 \text{ А/мм}^2.$$

Низкая плотность тока в короткозамыкающем кольце данного двигателя объясняется необходимостью развития сечения короткого замыкающего кольца, которое, как это видно из рис. 5, является конструктивной опорой стального бандажа.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТКОВ РОТОРОВ

Большое разнообразие короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей, исходя из конструктивно-теоретических признаков, можно подразделить на:

одноклеточные с круглыми стержнями (простая короткозамкнутая клетка);

одноклеточные с глубоким пазом (глубокопазные);

одноклеточные со стержнями специального профиля (бутылочного, клинообразного, трапециoidalного и т. п.);

с двойной короткозамкнутой клеткой (двухклеточные).

Исходя из технологических признаков и области применения, эти обмотки подразделяются на:

состоящие из составных элементов;

выполненные путем заливки алюминием;

полученные путем переделки асинхронных роторов с фазной обмоткой;

пусковые обмотки синхронных двигателей.

Пусковые обмотки роторов синхронных двигателей, как правило, состоят из круглых стержней, закладываемых в расположенные в полюсах ротора соответствующие пазы, и различаются только способом расположения и крепления короткозамыкающих сегментов, а также материалом стержней и колец.

Исключение в конструктивном отношении составляют пусковые клетки синхронных турбодвигателей на 3000 об/мин. Но так как ремонт их обычно связан с перемоткой рабочей обмотки роторов и выполняется только специализированными ремонтными организациями, в данной книге они не рассматриваются.

По требованиям, предъявляемым к прочности элементов беличьих клеток и соединений стержней с короткозамыкающими кольцами, короткозамкнутые обмотки относят к двум категориям:

II — соединения, выполняемые для двигателей с окружной скоростью 50 м/с и выше;

III — соединения, выполняемые для двигателей с окружной скоростью ниже 50 м/с.

Для определения окружной скорости v , м/с, пользуются формулой

$$v = \frac{\pi D_k n}{100 \cdot 60}, \quad (11)$$

где n — номинальная частота вращения двигателя, об/мин; D_k — средний диаметр короткозамыкающего кольца, см.

В качестве конструктивных мер, способствующих повышению прочности короткозамкнутых обмоток, применяют:

цельные, изготовленные из литых прокованных заготовок короткозамыкающие кольца;

надежное закрепление в пазах стержней специальной формы (рис. 6);

увеличение сечения короткозамыкающих колец и площади контакта соединения стержня с кольцом;

бандажные кольца из стальных поковок, закрепляемые на короткозамыкающих кольцах;

специальные припои, главным образом марки ПСр45, с 45%-ным содержанием серебра.

Для обмоток III категории допускается применение сварных короткозамыкающих колец с одним или несколькими стыками и применение менее качественных припоев (например, марки ПМФ7).

В ряде случаев соединения роторов с окружной скоростью ниже 50 м/с, но работающих в установках с тяжелым пуском, следует относить к соединениям II категории.

Теперь перейдем к рассмотрению конструктивных форм короткозамкнутых обмоток согласно приведенной выше классификации. При ознакомлении с конструкцией обмоток кратко охарактеризуем пусковые и рабочие свойства короткозамкнутых обмоток и определим причины возникновения тех или иных конструкций беличьих клеток.

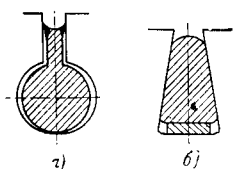


Рис. 6. Закрепление в пазах стержней специальной формы.

а — «бутылочной» чеканкой; *б* — трапециевидальной — расклиновкой.

Основные конструкции короткозамкнутых обмоток крупных роторов асинхронных двигателей. Одноклеточные роторы с круглыми медными стержнями. К этому типу можно отнести ротор асинхронного двигателя типа КАМО 133-2, 290 кВт, 6000 В, 2980 об/мин, изображенный на рис. 5. Сердечник ротора состоит из пакетов 1, набранных из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, плотно насаженных на вал 2. С обеих сторон сердечник зажат нажимными шайбами 3, которые фиксируются пружинными кольцами 5, закладываемыми в специальные кольцевые проточки на валу ротора. От проворота по валу сердечник предохраняется продольной шпонкой 4. Для предотвращения распухания сердечника в пазовой зоне под нажимные шайбы закладываются крайние листы 6 из листовой стали толщиной 3—5 мм.

Беличья клетка состоит из 38 медных стержней 7 диаметром 14 мм и длиной 390 мм и двух медных короткозамыкающих колец 8 средним диаметром 39,6 см, спаянных со стержнями и посаженных на выточки нажимных шайб. Короткозамыкающие кольца закрепляют

бандажными кольцами 9 из стальных поковок. Последние крепятся болтами 10 к нажимным шайбам.

В бандажных кольцах расположены кольцевые выточки для помещения балансировочных грузов. С обеих сторон ротора помещены вентиляторы 11, способ крепления которых ясен из рисунка. Основные размеры ротора указаны на чертеже.

По критериям прочности беличью клетку этого ротора следует отнести к конструкции II категории, так как его окружная скорость

$$v = \frac{\pi D_{\text{кр}} n}{100 \cdot 60} = \frac{3,14 \cdot 39,6 \cdot 2980}{6000} = 61,7 \text{ м/с.}$$

Стальное бандажное кольцо должно обеспечить прочность узла короткозамыкающих колец. Кроме того, эти кольца улучшают пусковые характеристики электродвигателей. Последнее обусловлено возникновением в массивных стальных кольцах больших магнитных потерь при большой частоте тока ротора, что эквивалентно увеличению активного сопротивления роторной цепи. По мере уменьшения частоты тока ротора активное сопротивление роторной цепи уменьшается.

В настоящее время асинхронные двигатели с простыми беличьими клетками почти не изготавливают, но в эксплуатации находятся еще много таких двигателей отечественного производства и иностранных фирм.

Роторы с глубоким пазом (глубокопазные). Появление глубокопазных роторов было связано с необходимостью увеличения начального пускового момента двигателя в условиях тяжелых пусков под нагрузкой.

Кратность начального пускового момента ($M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$ — отношение начального пускового момента к номинальному) двигателей с простой беличьей клеткой, находящихся в эксплуатации, составляет обычно 0,7—1,3, а у некоторых моделей и еще ниже — до 0,4.

Этот показатель регламентируется ГОСТ 183-74; начальный пусковой вращающий момент асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей при асинхронном пуске должен быть не ниже 85% номинального.

Следует заметить, что двигатель с простой короткозамкнутой клеткой может быть рассчитан и на большую кратность пускового момента (увеличением омического

сопротивления обмотки ротора), но это вызывает увеличение номинального скольжения s_n , величина которого может оказаться за пределами общепринятых значений. Потери энергии двигателя в рабочем режиме при этом сильно увеличиваются. Увеличение номинального скольжения от простого увеличения омического сопротивления беличьей клетки показано на рис. 7, где изображены графики зависимости момента двигателя от частоты вращения и скольжения, называемые *механическими характеристиками*. Кривая 1 — механическая характеристика простого короткозамкнутого двигателя; кривая 2 — механическая характеристика того же двигателя с искусственно увеличенным омическим сопротивлением

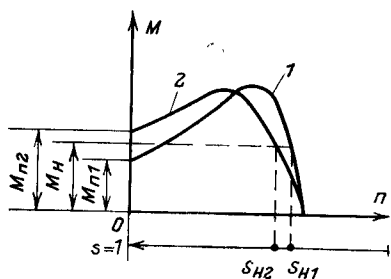


Рис. 7. Влияние изменения активного сопротивления ротора на скольжение и механические характеристики.

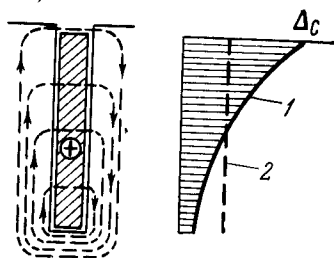


Рис. 8. Поток рассеяния пазов ротора и распределение плотности тока в стержнях.

беличьей клетки (например, за счет изменения материала стержней или уменьшения сечения стержней); $M_{п1}$ и $M_{п2}$ — соответственно начальные пусковые моменты двигателя с разными беличьими клетками; *отрезок* s_{n1} — s_{n2} — увеличение скольжения при номинальном моменте M_n .

Глубокопазные двигатели позволяют увеличить кратность пускового момента (практически до 1,5—2) без увеличения номинального скольжения. В этих двигателях используется явление вытеснения тока в стержнях обмотки ротора, обусловленное пазовыми потоками рассеяния.

В начальный момент включения двигателя в сеть, когда скольжение $s=1$, частота в роторе равна частоте сети. В этом случае картина пазового потока имеет вид,

изображенный на рис. 8, где показан график распределения плотности тока по высоте стержня. Из этого рисунка видно, что различные по высоте участки стержня сцеплены с различным числом линий потока рассеяния, причем наибольшее число линий приходится на нижний участок стержня. В результате в этих участках будут индуцироваться наибольшие э. д. с. рассеяния, а в верхних — наименьшие. Действие этих э. д. с. вызовет вытеснение тока к наружным частям проводника (распределение плотности тока по высоте проводника определяется кривой 1 на рис. 8); это обусловит увеличение активного сопротивления стержней ротора в момент пуска двигателя при частоте тока в роторе 50 Гц.

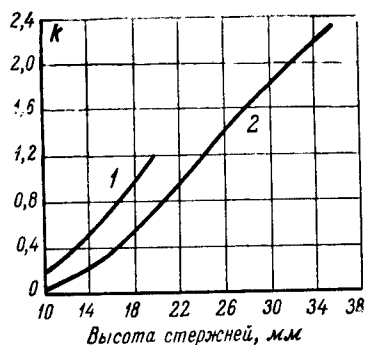


Рис. 9. Кривые для определения активного сопротивления стержней беличьих клеток двигателя. 1 — с двумя клетками; 2 — с одной клеткой.

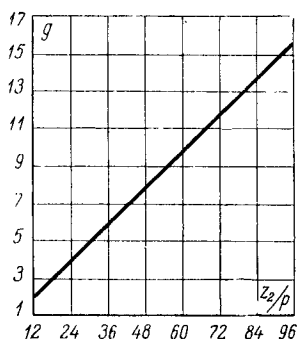


Рис. 10. Кривая для определения тока в кольце.

По мере разгона ротора двигателя частота тока в беличьей клетке уменьшается, и при установившемся режиме она дойдет до очень малых значений 1—3 Гц. При этом явление вытеснения тока будет ослабевать, и в конце концов ток распределится по сечению проводника равномерно (прямая 2 на рис. 8).

Активное сопротивление ротора будет при этом постепенно уменьшаться и в установившемся режиме станет практически равным омическому сопротивлению. При нормальной частоте вращения глубокопазный двигатель работает как обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, однако при пуске благодаря уве-

личению активного сопротивления ротора, вызванного вытеснением тока, он имеет больший начальный момент.

Таким образом, активное сопротивление беличьей клетки в отличие от омического — величина переменная и зависит от частоты тока в роторе, т. е. от скольжения. Особый интерес представляет активное сопротивление при $s=1$, так как оно определяет значение пускового момента двигателя. Это сопротивление, Ом, может быть определено по формуле

$$R_2 = \frac{\rho_c}{S_c} (l_c + l_1 k) 10^{-2} + \frac{2\rho_{\text{кг}} g \pi D_{\text{к}}}{S_{\text{к}} Z_2}, \quad (12)$$

где l_1 — расчетная длина активной стали, равная длине стали ротора за вычетом половины вентиляционных каналов, см; k — коэффициент, учитывающий влияние вытеснения тока, определяется в зависимости от высоты стержня по кривой на рис. 9; g — отношение тока в кольце к току в стержне определяется в зависимости от числа пазов на пару полюсов ротора по прямой на рис. 10.

Предположим, что стержни двигателя, изображенного на рис. 5, выполнены не круглого сечения, а прямоугольного (в виде узкой полосы, как это делается в глубокопазном роторе) с равновеликим сечением, например, размером 5×31 мм. Тогда омическое сопротивление r_2 в обоих вариантах будет одинаковым, а активное сопротивление в момент пуска R_2 для беличьей клетки со стержнями круглого сечения будет гораздо меньше, чем для глубокопазной клетки. Пользуясь кривыми на рис. 9 и 10 и формулой (12), произведем подсчет:

для круглых стержней ($k=0,25$; $g=6$)

$$R_{2\text{кр}} = \frac{(38 + 30 \cdot 0,25) \cdot 10^{-2}}{57 \cdot 154} + \frac{2 \cdot 6^2 \cdot 3,14 \cdot 38 \cdot 10^{-2}}{57 \cdot 800 \cdot 38} = 1,082 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

для прямоугольных стержней ($k=1,9$; $g=6$)

$$R_{2\text{пр}} = \frac{(38 + 30 \cdot 1,9) 10^{-2}}{57 \cdot 155} + \frac{2 \cdot 6^2 \cdot 3,14 \cdot 38 \cdot 10^{-2}}{57 \cdot 800 \cdot 38} = 1,577 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

$$\text{Отношение } \frac{R_{2\text{пр}}}{R_{2\text{кр}}} = \frac{1,577 \cdot 10^{-4}}{1,082 \cdot 10^{-4}} = 1,45.$$

Начальный пусковой момент двигателя в относительных единицах (в долях номинального момента) равен:

$$M_{\text{п}} = \frac{I_{2\text{к}}^2 R_2 Z_2}{100 P_2}, \quad (13)$$

где $I_{2к}$ — пусковой ток в пазу ротора, А; R_2 — активное сопротивление ротора при пуске, Ом; Z_2 — число пазов ротора; P_2 — номинальная мощность двигателя, кВт.

Из формулы (13) и подсчитанного отношения $R_{2пр}/R_{2кр}$ следует, что начальный пусковой момент глубокопазного двигателя будет почти в 1,5 раза больше начального пускового момента такого же двигателя, но с простой беличьей клеткой.

Из формулы (13) можно сделать еще один очень важный вывод. Для достижения необходимого пускового момента (в зависимости от приводимого механизма) при достаточно большом R_2 в глубокопазном двигателе можно существенно снизить пусковой ток ротора. Пусковой ток статора $I_{1к}$ находится в следующей зависимости с током $I_{2к}$:

$$I_{2к} \approx 5,6 \frac{\omega_1 I_{1к}}{Z_2}.$$

Следовательно, снижение тока $I_{2к}$ можно произвести путем соответствующего уменьшения пускового тока двигателя $I_{1к}$.

Таким образом, глубокопазные двигатели позволяют снижать пусковой ток двигателя, что повышает устойчивость работы питающей сети в случаях, когда мощность этой сети соизмерима с мощностью питаемого электрооборудования. Практически ограничение тока $I_{1к}$ может быть достигнуто путем соответствующего расчета обмотки статора (пуск со звезды с переключением на треугольник для рабочего режима) или за счет введения дополнительной аппаратуры, снижающей подводимое к статору напряжение (автотрансформаторы, реакторы).

По конструкции глубокопазные роторы, кроме формы стержней и способа их крепления к короткозамыкающим кольцам, ничем не отличаются от роторов с простой беличьей клеткой.

На рис. 11,а приведен разрез паза глубокопазного двигателя типа А114-8, 250 кВт, 500 В, а на рис. 11,б —

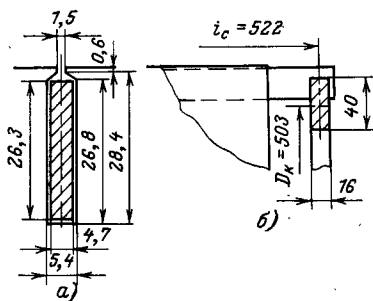


Рис. 11. Паз ротора и соединение стержня с кольцом глубокопазного двигателя типа А114-8.

эскиз соединения стержня этого двигателя с короткозамыкающим кольцом. Такой вид соединения характерен для большинства глубокопазных двигателей.

Из ранее выпускаемых нашей промышленностью глубокопазных двигателей мощностью выше 100 кВт основной является серия ГАМО. Двигатели этой серии до настоящего времени работают в установках электростанций и промышленности. Основные данные двигателей 11, 12 и 13-го габаритов серии ГАМО завода «Электросила» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток статора, А	Кратность пус- кового тока	Длина ротора с каналами, мм	Диаметр рото- ра, мм	Число пазов ротора	Начальный пусковой ток в стержне рото- ра, А	Высота стерж- ня, мм	Ширина стерж- ня, мм
ГАМО11-4-4	115	220	367	5,2	190	350	50	4070	30	4
ГАМО11-5-4	115	3000	27	5,5	240	350	50	3980	30	4
ГАМО11-6-4	135	3000	31,5	5,8	290	350	50	4170	30	4
ГАМО11-7-4	160	3000	37,5	6,5	340	350	50	4870	30	4
ГАМО11-4-6	75	220	249	6,0	190	390	58	3500	30	3
ГАМО11-5-6	80	3000	20	5,1	240	390	58	3250	30	3
ГАМО11-6-6	100	3000	24,5	5,6	290	390	58	3850	30	3
ГАМО11-7-6	115	3000	28,3	5,8	340	390	58	3560	30	3
ГАМО12-6-4	200	3000	46	5,1	290	420	46	4600	40	3,5
ГАМО12-7-4	235	3000	54	5,4	340	420	46	4800	40	3,5
ГАМО12-8-4	270	3000	62,5	6,3	390	420	46	5740	40	3,5
ГАМО12-5-6	135	3000	32,5	4,5	240	460	54	4200	30	4,5
ГАМО12-6-6	165	3000	40	4,5	290	460	54	4320	30	4,5
ГАМО12-7-6	190	3000	45	5,0	340	460	54	4560	30	4,5
ГАМО12-8-6	220	3000	52	5,5	390	460	54	5120	30	4,5
ГАМО13-6-4	325	3000	75	5,5	290	475	54	6340	35	5
ГАМО13-7-4	375	3000	86	5,6	340	475	54	6290	35	5
ГАМО13-8-4	430	3000	98	5,6	390	475	54	6230	35	5
ГАМО13-7-6	270	3000	64	5,4	340	525	72	4770	30	4
ГАМО13-8-6	310	3000	73,3	5,4	390	525	72	5270	30	4

Роторы с двойной короткозамкнутой клеткой (двух-клеточные). Глубокопазные двигатели хотя и обеспечивают необходимый повышенный пусковой момент двигателя, но имеют существенные недостатки, исключающие использование этих двигателей в широком диапазоне частот вращения и мощностей (подробнее о недостатках глубокопазных клеток будет сказано в § 3).

В связи с этим большое распространение получили асинхронные двигатели с двойной короткозамкнутой клеткой в роторе.

На рис. 12 представлена конструкция быстроходного ($n_c=3000$ об/мин) двухклеточного ротора асинхронного двигателя типа АТМ-500-2. Рабочая клетка этого двигателя состоит из 32 медных стержней диаметром 18 мм, которые спаяны фосфористой бронзой с латунными короткозамыкающими кольцами; последние одновременно являются и нажимными шайбами, стягивающими пакеты активной стали. Пусковая клетка состоит из 32

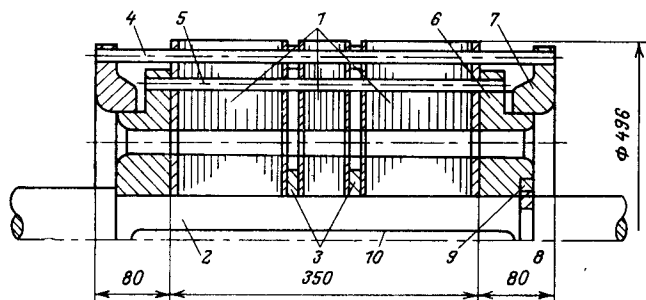


Рис. 12. Двухклеточный ротор асинхронного двигателя типа АТМ-500-2.

1 — пакеты шихтованного ротора; 2 — вал; 3 — дистанционные кольца; 4 — бронзовый стержень пусковой клетки; 5 — медный стержень рабочей клетки; 6 — латунное короткозамыкающее кольцо рабочей клетки; 7 — стальное короткозамыкающее кольцо клетки; 8 — кольцевая шпонка; 9 — предохранительное кольцо; 10 — шпонка.

бронзовых стержней диаметром 18 мм, спаянных со стальными короткозамыкающими кольцами серебряным припоем марки ПСр45.

Наибольший нагрев имеет место в стержнях и кольцах пусковой клетки в период пуска (достигает 300—400°C). Конструкция предусматривает свободное температурное удлинение стержней пусковой клетки; при этом стальные кольца пусковой клетки могут перемещаться по выточкам латунных колец рабочей клетки.

Следует заметить, что приведенная на рис. 12 конструкция роторов типа АТМ является устаревшей (выпускались нашими заводами до 1950 г.); но в эксплуатации, в установках собственных нужд электростанций и в промышленности в настоящее время находится много таких машин.

Некоторые данные о модернизации двигателей серии АТМ и рекомендации по реконструкции роторов типа АТМ первого выпуска будут приведены в § 4.

Принцип действия двухклеточного двигателя следующий: стержни внутренней клетки глубже погружены в стальную среду сердечника с большей магнитной проводимостью для потоков рассеяния, чем внешняя клетка, и поэтому обладают значительно большим индуктивным сопротивлением при пуске двигателя, когда частота в роторе велика (в первый момент равняется частоте сети). Ток распределяется между обеими клетками (обмотками) обратно пропорционально их полным сопротивлениям, а так как внутренняя клетка имеет весьма большое индуктивное сопротивление, то и полное сопротивление получается в несколько раз больше полного сопротивления внешней клетки, индуктивное сопротивление которой практически равно нулю.

В верхней клетке, наоборот, ток при пуске имеет не только значительную величину, но вследствие очень малого индуктивного и большого активного сопротивления за счет применения материалов со сравнительно большим удельным сопротивлением (табл. 1) этой клетки является почти чисто активным током. Поэтому эта

обмотка (клетка) создает весьма большой вращающий момент.

Следовательно, в период пуска вращающий момент развивается главным образом током внешней клетки, которая поэтому называется *пусковой*.

По мере возрастания частоты вращения ротора частота тока в его обмотках соответственно уменьшается, вследствие этого снижается

индуктивное сопротивление внутренней клетки и увеличивается активная составляющая тока. В результате эта клетка начинает создавать постепенно возрастающий вращающий момент.

При нормальной частоте вращения ротора и, следовательно, весьма небольшом скольжении индуктивное сопротивление внутренней клетки станет очень малым. Тогда вращающий момент будет создаваться главным образом внутренней клеткой, ток в которой будет значительно больше, чем во внешней клетке, из-за сравни-

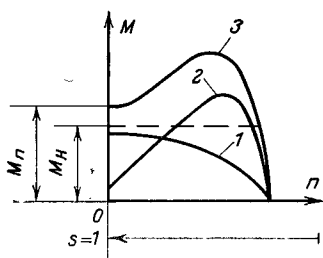


Рис. 13. Кривые моментов вращения двухклеточного двигателя.

тельно малого сопротивления внутренней клетки, изготовляемой из меди. Поэтому внутренняя клетка называется *рабочей*.

На рис. 13 показаны кривые моментов двухклеточного двигателя, развиваемых токами обеих клеток: кривая 1 — от внешней клетки; кривая 2 — от внутренней клетки; кривая 3 — суммарного момента.

Двигатели с двойной клеткой могут быть выполнены с любым значением пускового момента — от номинального до двойного, а в некоторых специальных случаях — до тройного.

Материалом для рабочей клетки (для стержней и для колец), как правило, является медь (обычно марок М1 и М2 по ГОСТ 859-66).

Для стержней пусковой клетки в отечественном электромашиностроении чаще всего применяют латуни, характеристика которых дана в табл. 3.

Кольца пусковой клетки, как и рабочей, в большинстве конструкций изготовляют медными. Но в отдель-

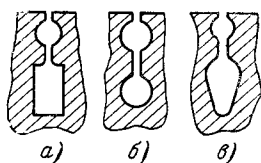


Рис. 14. Пазы двухклеточного ротора.

Таблица 3

Материал	Марка по ГОСТ 1527-70	Химический состав, %					Плотность при 20°C, г/см ³	Удельное электросо- противление при 20°C, Ом·мм ² /м
		Медь	Свинец	Марганец	Разные примеси	Цинк		
Латунь	Л63	62,0—65,0	—	—	0,5	Осталь- ное	8,43	0,071
Латунь свинцовистая	ЛС59-1	57—60	1,9	—	0,75		8,5	0,065
Латунь марганцовистая	ЛМЦ-58-2	57—60	—	1—2	1,2		8,5	0,108

ных типах двигателей как отечественного, так и зарубежного производства для стержней и колец, кроме перечисленных материалов, применяют различные бронзы и даже сталь.

Формы пазов двухклеточного ротора могут быть различными (рис. 14, а—в), но наиболее употребительной для роторов крупных двигателей является форма, изображенная на рис. 14, б (обе клетки с круглыми стерж-

нями). Из двухклеточных асинхронных двигателей наибольшее распространение получили: для $2p=2$ двигатели типа АТМ; для $2p=4$; 6; 8; 10 и 12 двигатели типа ДАМСО. Основные данные короткозамкнутых обмоток этих типов двигателей приведены в табл. 4 и 5.

Следует отметить, что в прошлом двухклеточные двигатели нередко называли двигателями Бушера в связи с тем, что фирма, возглавляемая инж. Бушера, строила такие двигатели. Это было отражено буквой Б в обозначении типов двигателей, выпускавшихся нашими заводами — БАМСО. Изменение в дальнейшем шиф-

Таблица 4

Тип двигателя	Длина актив- ной стали ротора, мм	Длина стержня, мм		Общая масса ротора, кг
		Масса стержня, кг		
		Пусковая клетка (бронза)	Рабочая клетка (медь)	
АТМ-500-2	350	$\frac{520}{1,18}$	$\frac{430}{0,98}$	935
АТМ-700-2	450	$\frac{620}{1,41}$	$\frac{530}{1,20}$	1065
АТМ-850-2	525	$\frac{695}{1,58}$	$\frac{605}{1,37}$	1275

Примечание. Общее количество стержней каждой клетки 32, диаметр стержней 18 мм. Материал короткозамыкающих колец пусковой клетки—сталь (масса 24 кг), рабочей клетки—латунь (масса 43 кг).

ра на ДАМСО связано с именем изобретателя двухклеточного двигателя — нашего соотечественника инж. М. О. Доливо-Добровольского.

Роторы с пазом специального профиля. Роторы с двойной короткозамкнутой клеткой для приводов, где пусковой момент может быть не выше $1,6 M_n$, с успехом могут быть заменены более надежными в эксплуатации и более простыми в технологии производства одноклеточными роторами с пазом специальной формы.

Одноклеточные роторы по сравнению с двухклеточными имеют следующие технологические преимущества: при их использовании отпадает необходимость изготовления верхней клетки и связанной с ней сложной

пайки стержней и колец, изготавливаемых из разных материалов;

не требуется наружной обработки короткозамыкающих колец (при двухклеточном исполнении отходы меди при обработке колец составляют до 10—15% массы колец);

Таблица 5

Габарит двигателя	Число полюсов двигателя типа ДАМСО, <i>p</i>	Число пазов ротора	Стержни $\frac{\text{верхний (латунь)}{\text{нижний (медь)}}$					Короткозамыкающие кольца $\frac{\text{верхнее (медь)}{\text{нижнее медь}}$	
			Диаметр, мм	Полная длина при числе пакетов активной стали, мм				Средний диаметр, мм	Размеры сечения, мм
				7	8	10	12		
14	4	52	15	532	582	682		495	20×47
			15	472	522	622	—	453	20×47
	6	82	12	507	557	657		566	12,5×37
			11	464	514	614	—	533	16×37
	8	86	12	497	547	647		565	12,5×37
			11	457	507	607	—	533	12,5×37
	10 и 12	106	10	497	547	647		610	12,5×30
			10	457	507	607	—	575	12,5×30
	4	52	17	—	504	584	664	574	16×62
			17	—	462	542	622	551	25×39
15	6	82	12	464	504	584	664	670	16×47
			12	414	454	534	614	620	16×37
	8	86	12	502	555	655	755	692	12,5×37
			11	462	512	612	712	650	16×37
	10 и 12	106	12	507	557	657	757	710	12,5×37
			11	457	507	607	707	685	12,5×37

Примечание. Обозначение двигателей типа ДАМСО, например, ДАМСО 1510-6; 15—габарит, 10—число пакетов активной стали (длина модели), 6—число полюсов.

упрощенная форма паза одноклеточного ротора позволяет применить компаундный штамп при изготовлении стальных листов сердечника ротора;

при повреждении внутренней клетки двухклеточного ротора в эксплуатации восстановительный ремонт ее очень трудоемок, так как предварительно необходимо де-

монтировать верхнюю клетку, да и само обнаружение дефектов внутренней клетки при профилактических осмотрах двигателя с целью предупреждения аварий в эксплуатации чрезвычайно затруднительно.

В связи с этим для быстроходных и мощных двигателей была применена более простая и надежная конструкция одноклеточного ротора со стержнями «бутылочного» и трапецеидального профиля. На рис. 15 показан

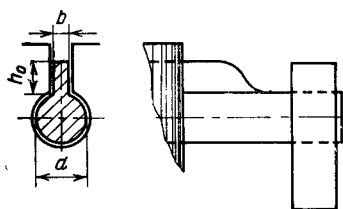


Рис. 15. Стержень и паз специального («бутылочного») профиля.

разрез паза и стержня бутылочного профиля, а также его связь с короткозамыкающим кольцом.

Медный стержень с утолщенной нижней частью помещается в паз бутылочной формы. Верхняя (прямоугольная) часть концов стержня срезана, а нижняя (цилиндрическая) входит в круглое отверстие короткозамыкающего кольца, также выполняемого из меди. Надежность роторов при пуске выше, чем глубокопазных.

Принцип получения повышенного пускового момента ротора с бутылочным пазом аналогичен получению повышенного пускового момента ротора в глубокопазном двигателе. Сравнительно большое активное сопротивление

Таблица 6

Номер профиля	Размеры (рис. 15), мм		
	d	b	h_0
1,0	9,0	4,0	12,0
2	10,5	4,0	12,0
3	12,0	4,0	12,0
4	14,0	4,0	12,0
5	18,0	5,0	12,0
6	20,0	5,5	12,0

ние при пуске обеспечивается малым сечением верхней прямоугольной части бутылочного стержня.

Как уже упоминалось, быстроходные двухклеточные двигатели типа АТМ позже были реконструированы и пускались как одноклеточные с пазом бутылочного профиля. Эксплуатационная надежность реконструирован-

ных двигателей повысилась. Медь бутылочного профиля изготавливается в виде прессованной заготовки с грубыми допусками, а затем протягивается до точных размеров с допуском 0,3 мм. Стандартные размеры меди бутылочного профиля указаны в табл. 6.

Что касается других видов стержней специальных профилей, то следует отметить серию асинхронных двух-полюсных двигателей типа АТД, представляющую собой модификацию серии АТМ.

Ротор двигателей типа АТД имеет короткозамкнутую обмотку со стержнями *трапецеидального* профиля.

Двигатели серии АТД имеют следующую шкалу мощностей, кВт:

500	} 1-й габарит
630	
800	
1000	} 2-й габарит
1250	
1600	
2000	} 3-й габарит
2750	

По своим пусковым свойствам стержни трапецеидального профиля не уступают стержням бутылочного профиля, обладая в то же время рядом преимуществ. Плотно прижимаясь к стенкам паза путем подклиновки, они значительно улучшают теплоотдачу от стержней к стали ротора. Подклиновка предотвращает вибрации стержней в пазу, что повышает механическую надежность ротора. Кроме того, стержни трапецеидального профиля проще в изготовлении, чем стержни бутылочного профиля.

Унификация профилей стержня ротора позволила довести для двигателей типа АТД число типоразмеров профилей до двух.

На рис. 16 приведены некоторые узлы и детали ротора двигателей типа АТД 1-го габарита.

Существенным изменением в роторах двигателей типа АТД по сравнению с типом АТМ является применение бандажных колец из немагнитной стали, которые защищают узел кольца — стержни от деформации в результате действия тепловых и механических факторов. В двигателях типа АТМ применяют бандажные кольца из магнитной стали, которые увеличивают начальный пусковой момент двигателя, но снижают максимальный

момент и ухудшают рабочие характеристики, особенно коэффициент мощности. Сильно нагреваясь при пуске, магнитные бандажные кольца не препятствуют тепловому расширению короткозамыкающих колец, что вызывает появление больших изгибающих напряжений в стержнях обмотки ротора.

Очередным этапом в повышении технико-экономических показателей и надежности асинхронных двигателей

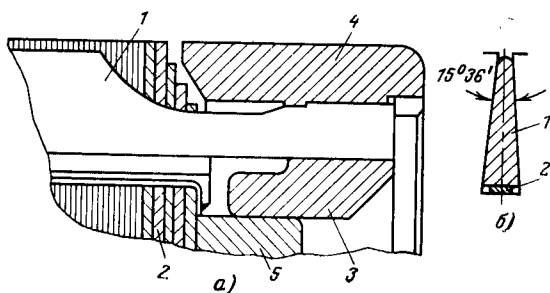


Рис. 16. Ротор типа АД 1-го габарита.

a — конструкция беличьей клетки; *б* — сечение паза ротора; 1 — стержень трапецеидального сечения; 2 — роторный клин; 3 — короткозамыкающее кольцо, 4 — стальное бандажное кольцо; 5 — нажимное кольцо.

с короткозамкнутым ротором является разработка и внедрение электродвигателей серии АД2 мощностью 315—5000 кВт. Электродвигатели этой серии, так же как и электродвигатели серии АД, имеют обмотку с трапецеидальными стержнями. Серия включает двухполюсные электродвигатели на номинальное напряжение:

660/380 В	для электродвигателей 500—800 кВт
6000 В	для электродвигателей 315—5000 кВт
10 000 В	для электродвигателей 1000—5000 кВт

Электродвигатели выпускаются в двух модификациях по пусковым характеристикам: Л — предназначенные для привода механизмов с легкими условиями пуска и модификации М — удовлетворяющие требованиям по пуску механизмов с тяжелыми условиями пуска.

Все двигатели выполнены в закрытом исполнении с замкнутым циклом вентиляции со встроенными водяными воздухоохладителями, кроме электродвигателей в диапазоне мощности 315—1600 кВт, имеющих защи-

ценное исполнение с разомкнутым циклом вентиляции. Основные технические показатели электродвигателей серии АТД2 приведены в табл. 7.

Роторы с беличьими клетками, полученными путем алюминиевой заливки. Заливка алюминием является главным видом исполнения обмотки роторов двигателей мощностью ниже 100 кВт, но в последнее время применяется и для более мощных двигателей.

Таблица 7

Мощность двигателя, кВт	Модификация по пусковым характеристикам	Ток статора, А	К. п. д., %	cos φ	Частота вращения, об/мин	Кратность		
						пускового тока	пускового момента	максимального момента
315	М	35,5	94,6	0,905	2980	7,0	1,3	2,4
400	М	44,2	95,2	0,915	2980	7,0	1,3	2,4
500	М	54,8	95,5	0,92	2980	6,0	1,2	2,1
630	Л	69,7	95,5	0,91	2975	6,0	0,9	2,4
800	М	70,5	95,4	0,9	2970	5,2	1,1	1,9
	Л	88,3	95,8	0,91	2975	6,0	0,9	2,5
1000	М	89,5	95,7	0,9	2970	5,2	1,1	1,9
	Л	111,0	96,0	0,91	2975	5,6	0,7	2,5
1250	М	113,0	95,7	0,89	2970	5,0	1,1	1,9
	Л	136,0	96,5	0,915	2980	6,5	0,8	2,7
1600	М	139,5	96,3	0,895	2975	5,5	1,3	2,1
	Л	173,0	96,8	0,92	2980	6,0	0,9	2,7
2000	М	177,0	96,5	0,90	2975	5,5	1,3	2,1
	Л	216,3	96,7	0,92	2980	5,5	0,7	2,6
2500	М	219,2	96,5	0,91	2975	4,8	0,8	2,1
	Л	266,7	97,0	0,93	2980	6,0	0,7	2,8
3200	М	270,0	96,8	0,93	2980	5,3	0,9	2,3
	Л	348,0	96,7	0,915	2985	6,3	1,3	2,6
4000	М	431,0	96,9	0,92	2985	6,3	1,3	2,6
5000	М	535,0	97,6	0,925	2985	6,5	1,3	2,7

Заливка алюминием является прогрессивным технологическим процессом, при котором с наименьшими затратами труда и материала получается готовая обмотка, состоящая из стержней, замыкающих колец и крылышек вентилятора. Заливка алюминием не предъявляет высоких требований к качеству поверхности стенок паза, может быть выполнена при любой форме пазов и обеспечивает хороший контакт между стержнями и кольцами без применения пайки или сварки. Отливка вентиляционных крылышек вместе с обмоткой обеспечивает

хороший отвод тепла от обмотки и не требует изготовления отдельных вентиляторов.

В двигателях нормального исполнения для заливки роторов применяют исключительно первичный алюминий, который гарантирует необходимое постоянство электрического сопротивления. Малейшие следы примесей резко увеличивают удельное сопротивление и делают его неопределенным.

Основной трудностью, возникающей при заливке ротора, является возможность образования трещин, неполной заливки и разрывов стержней вследствие того, что алюминий, особенно в расплавленном состоянии, активно окисляется. Поэтому при заполнении формы легко могут образоваться трещины и разрывы в местах, где встречаются струи жидкого металла. Качество отливок в значительной степени зависит от температуры нагрева роторов перед заливкой и расплавленного алюминия. Как показывает практика, температуру нагрева роторов надо приближать к температуре плавления алюминия и не допускать больших перегревов расплавленного алюминия над температурой плавления. В процессе остывания роторные стержни дают усадку, которая отчасти компенсируется за счет сжатия сердечника ротора. Если сердечник перед заливкой слишком сильно спрессован, то могут происходить разрывы стержней.

Существует несколько способов заливки роторов алюминием: статический, центробежный, вибрационный, под давлением и др. Подробнее с конструкциями, технологией производства и способами заливки алюминиевых роторов можно ознакомиться в [3].

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей, полученные путем переделки обмоток роторов с контактными кольцами. Характерной особенностью конструкций короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами, является то, что каждая конструкция носит индивидуальный характер и предназначена для привода какого-либо конкретного механизма. Этим объясняется большое разнообразие исполнений таких обмоток как по конфигурации стержней и короткозамыкающих колец, так и по применяемым для элементов беличьей клетки материалам. Так, например, в серийных одноклеточных роторах асинхронных двигателей материалом для стержней и короткозамыкающих колец является медь. В коротко-

замкнутых обмотках, переделанных из двигателей с контактными кольцами, в зависимости от произведенного расчета пускового и рабочего режимов двигателя, предназначенного для работы с данным конкретным механизмом, стержни одноклеточного ротора могут быть изготовлены из латуни или алюминия, а кольца — из латуни, алюминия, бронзы или стали.

В связи с тем, что при переделке роторов двигателей с контактными кольцами часто используют стержни старой фазной обмотки, в паз короткозамкнутого ротора кроме стержней ставят разного рода металлические прокладки и корбочки, которые уплотняют стержни в пазу, занимая место стоявшей ранее изоляции обмотки двигателя с контактными кольцами. Кроме того, эти стальные заполнители могут влиять на пусковые свойства переделанного ротора.

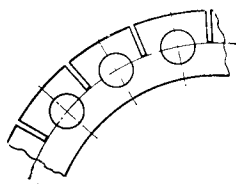


Рис. 17. Короткозамыкающее кольцо с прорезями.

Короткозамыкающие кольца не только изготавливаются из самых различных металлов, но и по конструкции могут быть решены разнообразно [например, общее короткозамыкающее кольцо для двухклеточной обмотки, межстержневые прорези, увеличивающие электрические сопротивления участков кольца (рис. 17), наплавленные кольца и другие варианты исполнения]..

Приведем несколько конструкций короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами.

На рис. 18,а представлен переделанный из ротора с контактными кольцами короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя типа АЗ-4500-1500, $P_n=4500$ кВт, $U_n=6000$ В, $n_c=1500$ об/мин.

Стержни 1 и короткозамыкающие кольца 2 выполнены из латуни. Латунь для стержней выбрана из условий обеспечения повышенного пускового момента, так как она обладает значительно большим удельным электросопротивлением, чем медь. Нормальная работа стержней в рабочем режиме двигателя, когда ток распределяется равномерно по всему сечению стержня, обеспечивается увеличенным (по сравнению с сечением обмотки двигателя с контактными кольцами, состоявшей из двух изолированных медных стержней) сечением ла-

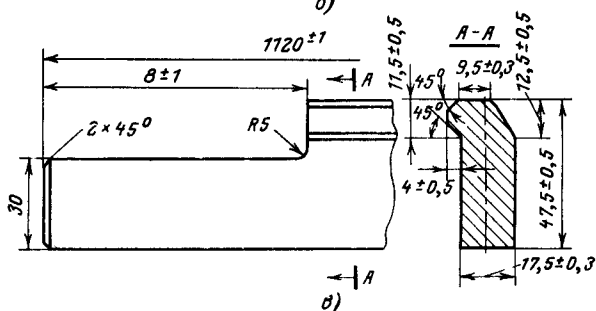
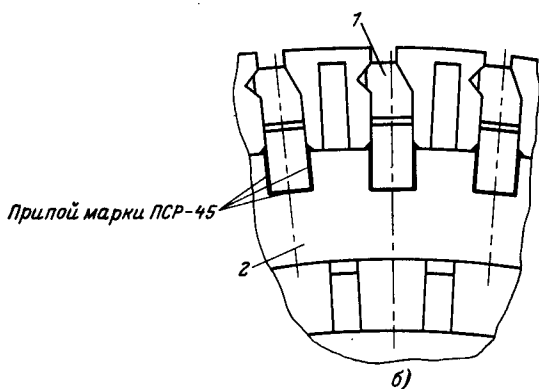
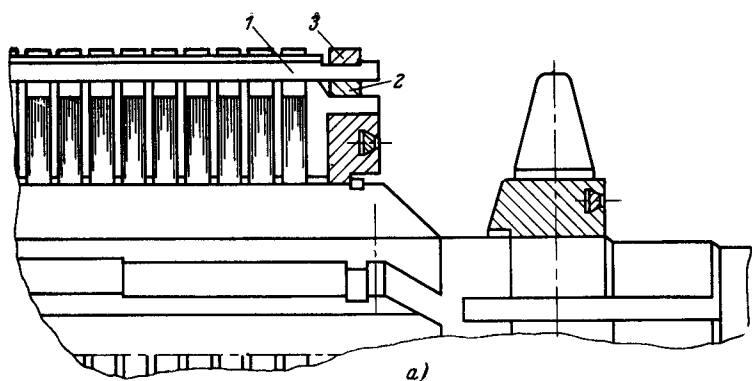


Рис. 18. Ротор типа АЗ-4500-1500.

а — общий вид; б — размещение стержня в пазу ротора и соединение его с короткозамыкающим кольцом; в — чертеж стержня.

тунного стержня за счет использования места, занимаемого ранее изоляцией фазных стержней, а также за счет использования места пазового клина. Необходимость последнего в реконструированном роторе отпадает, так как его роль выполняет сам стержень (рис. 18,б и в).

Короткозамыкающие кольца представляют сварную заготовку с профрезерованными пазами. Что касается материала колец, то им могла бы быть и медь (от этого пусковые и рабочие качества двигателя изменились бы мало, так как необходимое сечение колец можно было выбрать и для меди). Но в данной конструкции выбрана для колец латунь из условий наиболее технологичного соединения однородных металлов стержней и колец. Соединение стержней с короткозамыкающими кольцами (рис. 18) выполнено серебряным припоем марки ПСр45 с тщательной пропайкой всех контактируемых поверхностей.

Бандажные кольца 3 предохраняют обмотку ротора от разрушения в результате больших механических напряжений, возникающих при работе двигателя от действия центробежных сил при окружной скорости этого ротора примерно 75 м/с. Бандажные кольца изготовлены из специальной стали марки 12Х18Н9Т. Заготовки в виде полуколец устанавливают в специальные выступы стержней, крепят стягивающим приспособлением и сваривают в двух разъемах электросваркой с применением электродов марки УОНИ13 диаметром 3,5 мм.

На рис. 19 представлены детали конструкции беличьей клетки ротора переделанного двигателя с контактными кольцами фирмы Сан Георгия (Италия), 427 кВт, 6000 В, 145,5 об/мин.

Двигатель установлен в цехе химического завода и является приводом компрессора. Переделка на короткозамкнутое исполнение была связана с упрощением системы пуска двигателя и ликвидацией возможных очагов искрообразования в роторе с контактными кольцами (пробой изоляции стержней, перекрытие контактных колец).

Для стержней 1 (рис. 19) беличьей клетки использованы старые стержни обмотки ротора с контактными кольцами. Вместо слюдяной изоляции стержней в паз вставляется стальная коробочка 3. Крепление стержня и коробочки в пазу осуществляется текстолитовым клином 6.

Медное короткозамыкающее кольцо 2 диаметром около 2 м состоит из нескольких сегментов, спаянных серебряным припоем. Оптимальные размеры сегментов и их количество определяется технологическими соображениями и наличием соответствующего станочного оборудования.

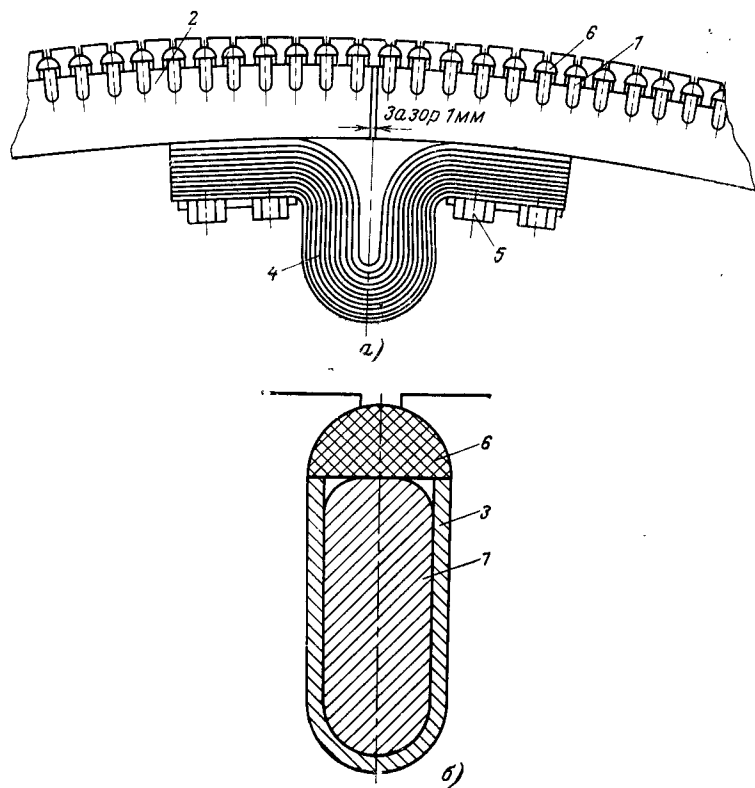


Рис. 19. Детали беличьей клетки.

a — соединение сегментов короткозамыкающего кольца при помощи компенсаторов; *б* — заполнение паза ротора.

В четырех местах соединение сегментов короткозамыкающего кольца осуществляется с помощью компенсатора 4, набранных из медных пластин толщиной 2 мм. Концы пакетов скреплены медными заклепками. Компенсаторы крепятся к короткозамыкающим сегментам болтами 5. После закрепления компенсаторов концы па-

кетов пропаивают серебряным припоем, одновременно пропаивается место контакта компенсаторов с сегментами. В местах установки компенсаторов между соседними короткозамыкающими сегментами оставляют зазор около 1 мм, который обеспечивает свободное удлинение частей короткозамыкающего кольца от действия высо-

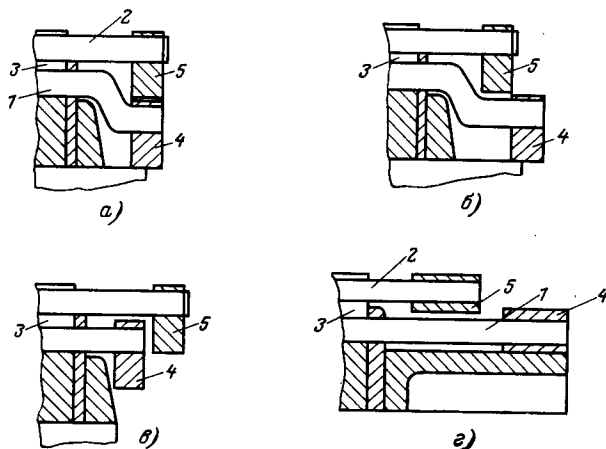


Рис. 20. Расположение короткозамыкающих колец в роторах, переделываемых из роторов с контактными кольцами.

1 — стержень рабочей клетки; 2 — стержень пусковой клетки; 3 — стальная прокладка; 4 — кольцо рабочей клетки; 5 — кольцо пусковой клетки.

ких температур, возникающих главным образом в процессе пуска двигателя.

Следует отметить, что установка компенсаторов в конструкциях с крупногабаритными короткозамыкающими кольцами не всегда необходима и определяется тепловым и механическим расчетами при конструировании беличьей клетки.

Наиболее часто подвергаются переделке в короткозамкнутое исполнение роторы двигателей с контактными кольцами типа АМО, ФАМСО в диапазоне мощностей 100—500 кВт при частотах вращения 600—1500 об/мин. При двух беличьих клетках можно получить высокий пусковой момент и использовать стержни старой обмотки. Внутренняя клетка обычно выполняется из медных стержней и медных колец, наружная — из медных стержней и стальных или медных колец.

Расположение колец и вылетов стержней может быть выполнено по одному из видов, показанных на рис. 20. В конструкции по рис. 20,а—в кольца изготавливают отдельно из меди или стали, снабжают нарезными пазами и припаивают к стержням. Расположение колец и вылетов стержней по рис. 20,а и б обеспечивает доступ к местам пайки колец со стержнями и дает возможность производить ремонт (пропайку) рабочей клетки без разборки пусковой клетки. Концентрическое расположение колец по рис. 20,а облегчает их центровку при сборке. Однако расположение колец по рис. 20,б имеет то преимущество, что кольца обеих клеток могут быть обработаны после пайки на станке за один прием, между тем как при расположении колец по рис. 20,а ротор надо ставить на станок 2 раза.

Возможно также расположение колец, показанное на рис. 20,в. Такая конструкция несколько проще, так как при этом нет необходимости изгибать стержни рабочей клетки. Однако, если паяные соединения рабочей клетки были выполнены неудовлетворительно, то при данной конструкции нельзя произвести ремонт без полной разборки пусковой клетки. Поэтому рекомендуется располагать кольца согласно рис. 20,а и б.

Расположение колец по рис. 20,г применяется в тех случаях, когда кольца обеих клеток выполняют наплавленными из меди. Отличительной особенностью этого

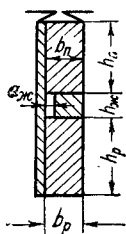


Рис. 21. Заполнение паза короткозамкнутого ротора, переделываемого из ротора с фазной обмоткой.

h_p и $h_п$ — высота стержня рабочей и пусковой клеток, мм; b_p и $b_п$ — ширина паза ротора за вычетом ширины вертикальной стальной прокладки для рабочей и пусковой клеток, мм; $h_ж$ — высота стальной прокладки между стержнями, мм; $a_ж$ — ширина воздушного зазора между межстержневой прокладкой и стенкой паза, мм.

способа является сохранение обмоткодержателей ротора с контактными кольцами. В конструкциях по рис. 20,а и б обмоткодержатели срезают полностью или обтачивают настолько, чтобы освободить место короткозамыкающему кольцу рабочей клетки.

Заполнение паза ротора для переделываемых двигателей средней мощности (от 100 до 500 кВт) чаще всего выглядит так, как это представлено на рис. 21.

Подобное заполнение паза характерно как для использования стержней ротора с контактными кольцами, так и для стержней, специально изготавливаемых из новой меди. Естественно, что при использовании стержней ротора с контактными кольцами $h_p = h_{\pi}$ и $b_p = b_{\pi}$.

При проектировании стержней из новой меди эти размеры в зависимости от расчета могут быть и разными.

При разных величинах b_p и b_{π} боковая стальная прокладка делится по высоте паза на две прокладки различной толщины в соответствии с размерами b_p и b_{π} .

Стальные прокладки для заполнения пространства между стержнями нарезают на строгальном или фрезерном станке из стали марки ст 3, прокладки имеют параллельные грани и удерживаются в пазах силой трения. Для облегчения сборки прокладки разделяют по длине на две половины, которые забивают в паз с обоих концов ротора. Прокладки можно установить в середине паза или к одной из его стенок.

Величина зазора $a_{ж}$ влияет на индуктивность пусковой клетки, а следовательно, и на пусковые свойства двигателя и определяется специальным расчетом.

Пусковые клетки роторов синхронных двигателей.

Большинство синхронных двигателей имеют асинхронный пуск, т. е. двигатели запускаются при помощи асинхронной обмотки ротора, представляющей собой обыкновенную беличью клетку. Беличья клетка ротора синхронного двигателя состоит, как правило, из круглых медных или латунных стержней, вставленных в пазы, расположенные в полюсных башмаках.

Короткозамыкающее кольцо образуется из отдельных сегментов (по количеству полюсов ротора).

Сегменты чаще всего соединяют болтами или непосредственно накладывают один на другой выступающими концами или соединяют специальными накладками (иногда компенсаторами).

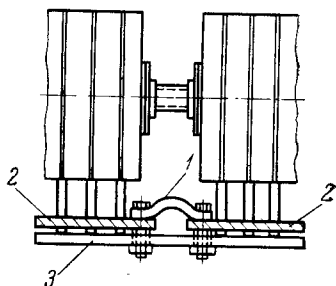


Рис. 22. Пусковая клетка синхронного двигателя со стальным бандажным кольцом.

Соединение сегментов со стержнями осуществляется пайкой различными твердыми припоями и практически ничем не отличается от приведенных выше соединений короткозамыкающих колец со стержнями в асинхронных двигателях.

Ниже приведено несколько конструктивных исполнений беличьих клеток синхронных двигателей. Конструкция, представленная на рис. 22, характерна наличием компенсаторов 1, соединяющих сегменты полюсов 2, и стального бандажного кольца 3, предохраняющего

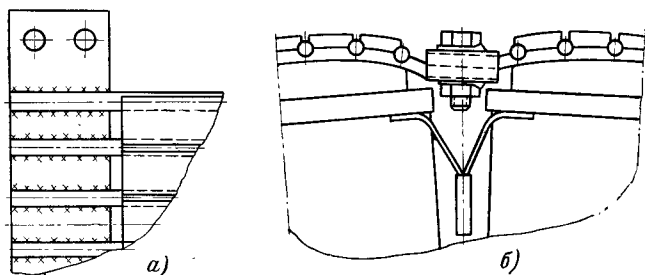


Рис. 23. Пусковая клетка синхронного двигателя с кольцами, расположенными плашмя.

a — соединение стержней с сегментами; *б* — соединение сегментов.

беличью клетку от разрушения под действием центробежных сил.

На рис. 23 представлена конструкция, в которой соединение сегментов производится при помощи хомутиков и болтов, соединяющих выступающие концы сегментов. Отличительной особенностью этой конструкции является расположение сегментов плашмя. Такое расположение сегментов позволяет увеличить площадь контакта сегментов со стержнями, а также снижает механические напряжения в кольце, возникающие от температурных факторов в период прохождения большого пускового тока. Изготовление сегментов, расположенных плашмя, технологически проще, чем сегментов, располагаемых на ребро.

Основным недостатком конструкции с сегментами, расположенными плашмя, является неудовлетворительная работа беличьей клетки при неодинаковом температурном удлинении отдельных стержней полюса — основ-

ной причине повреждения пусковых клеток синхронных двигателей. Беличья клетка с сегментами, расположенными на ребро, несколько проще воспринимает механические напряжения от неравномерного удлинения стержней полюса. В этом отношении большой интерес представляет новая конструкция пусковой клетки с компенсаторами на концах стержней. На рис. 24, а представлена такая конструкция для синхронного двигателя мощностью 2000 кВт с частотой вращения 1000 об/мин. Соединение медных стержней 1 с короткозамыкающими

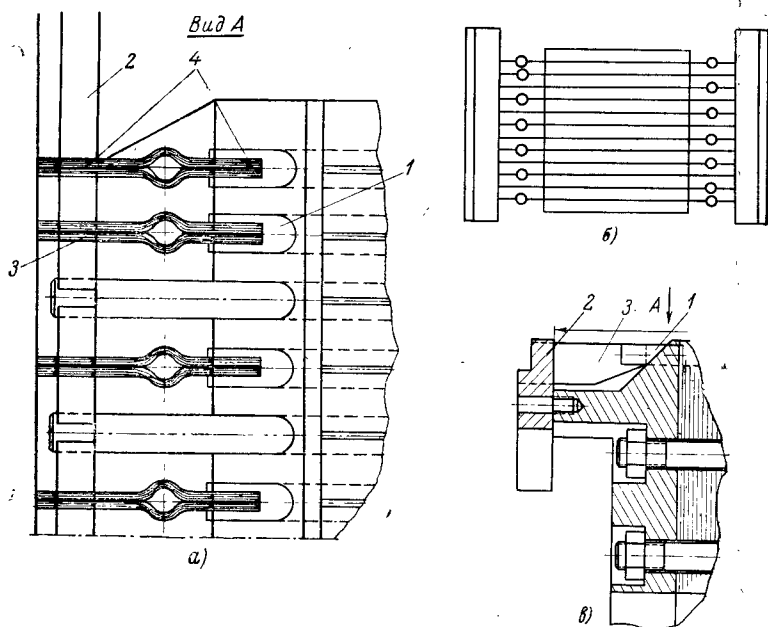


Рис. 24. Соединение стержней пусковой клетки с сегментами с помощью компенсаторов.

сегментами 2 осуществлено при помощи компенсаторов 3, которые представляют собой набор медных пластин особой формы, обеспечивающей необходимое для прохождения пускового тока сечение меди. В специальные вырезы стержней и короткозамыкающих колец пластины компенсатора впаиваются серебряным припоем марки ПСр25. Для более плотного контакта со стержнем и

кольцом пакеты компенсатора после вставки расклинивают медными пластинами-клиньями 4.

Таким образом, все температурные изменения длины стержней пусковой клетки благодаря работе компенсаторов не приводят к недопустимым механическим напряжениям в месте соединения стержня с кольцом. На рис. 24,б показана схема установки компенсаторов на полюсе двигателя. Как видно из рисунка, для каждого стержня достаточно только одного компенсатора либо с передней, либо с задней стороны. И только крайние стержни каждого полюса имеют компенсаторы с обеих сторон. Объяснением этому служит то обстоятельство, что, как показывают проведенные исследования, пусковой ток в крайних стержнях значительно больше, чем в средних (иногда на 30—40%), отсюда и больший их нагрев и удлинение при пуске. При двух компенсаторах обеспечивается более надежная работа крайних стержней.

Для некоторых двигателей в зависимости от расчета пускового режима может появиться необходимость установки компенсаторов с обеих сторон двух или трех крайних стержней на каждом полюсе.

Применение компенсаторов решает еще одну очень важную проблему конструкции пусковой клетки (в особенности для двигателей, имеющих высокую частоту вращения) — крепление короткозамыкающих сегментов.

В рассмотренной конструкции (рис. 24,в) короткозамыкающие сегменты наглухо прикреплены к основанию полюсов, так как компенсаторы исключают необходимость аксиального перемещения короткозамыкающих колец при температурном удлинении стержней. Это значительно повышает надежность работы короткозамыкающих колец, имеющих большие динамические нагрузки от центробежных сил. Последнее обстоятельство позволяет увеличить сечение короткозамыкающих сегментов с тем, чтобы снизить плотность тока в кольцах, уменьшить их нагрев за период пуска и избежать чрезмерных внутренних температурных напряжений в материале наглухо закрепленных сегментов.

На рис. 25 представлена конструкция пусковой клетки тихоходного синхронного двигателя с сегментами, расположенными на ребро. Соединение сегментов осуществляется выступающими концами на болтах без дополнительных соединяющих деталей. Схема расположе-

ния сегментов предусматривает монтаж полюсов (вставку) с разных сторон ротора, а также возможность смещения одной половины ротора (в случае разъемной конструкции ротора большого размера) относительно другой в аксиальном направлении.

Мы рассмотрели основные виды конструкций пусковых клеток синхронных двигателей. На практике или

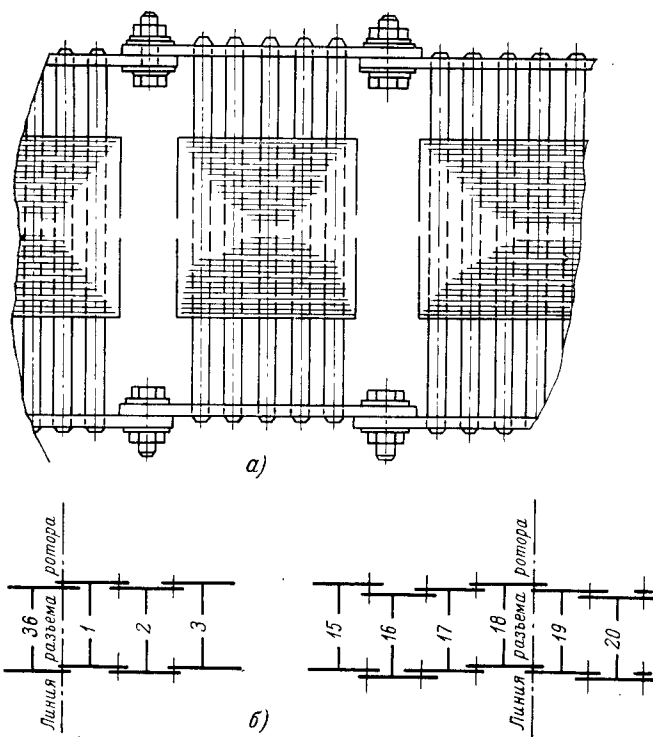


Рис. 25. Пусковая клетка разъемного ротора синхронного двигателя.

а — соединение сегментов; *б* — схема расположения сегментов с учетом аксиального сдвига половины ротора. Цифры указывают номер сегмента.

в литературе могут встретиться конструкции, в некоторых деталях отличные от разобранных по способу крепления и соединения сегментов и другим признакам, но принципиально они могут быть отнесены к одной из приведенных конструкций. Принцип расчета парамет-

ров пусковых клеток синхронных двигателей ничем не отличается от приведенного выше способа определения пусковых параметров беличьих клеток асинхронных двигателей.

3. ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТОК В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Виды повреждений. Наиболее характерные и часто встречающиеся в практике эксплуатации повреждения беличьих клеток заключаются в обрывах стержней. Обрыв стержня может произойти либо в пазовой части, либо на выступающем из активной стали конце, причем при обрыве стержня на выступающем конце различают два случая: обрыв на выходе из паза, отрыв стержня от короткозамыкающего кольца.

Обрыв выступающего конца стержня особенно неприятен, так как при этом выходит из строя не только обмотка ротора, но и весьма часто обмотка высокого напряжения статора, потому что оторванные концы стержней под действием центробежных сил отгибаются в направлении лобовых частей статорной обмотки и прорезают их. Восстановление же обмотки статора — дело очень сложное и дорогостоящее.

Часто имеют место трещины стержней, которые нарушают нормальную работу короткозамкнутой обмотки. В большинстве случаев в месте трещин довольно быстро наступает разрыв стержня, но иногда беличья клетка может сравнительно продолжительное время работать с лопнувшими (надтреснутыми) стержнями. Последнее весьма нежелательно в том отношении, что двигатель при этом работает не нормально, а обнаружить трещины доступными на месте эксплуатации средствами при профилактических осмотрах не всегда представляется возможным, и двигатель может аварийно выйти из строя в самое неподходящее для производственного процесса время.

К частым видам повреждения следует отнести распайки мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами. Этот вид повреждения почти всегда является следствием плохого качества пайки. При хорошо

выполненных пайках распайка мест соединения — явление чрезвычайно редкое.

К менее частым видам повреждения следует отнести разрывы короткозамыкающих колец под действием динамических напряжений от центробежных сил (в двигателях с большими окружными скоростями) или в результате механических перенапряжений, возникающих от температурных факторов, а также подгары болтов

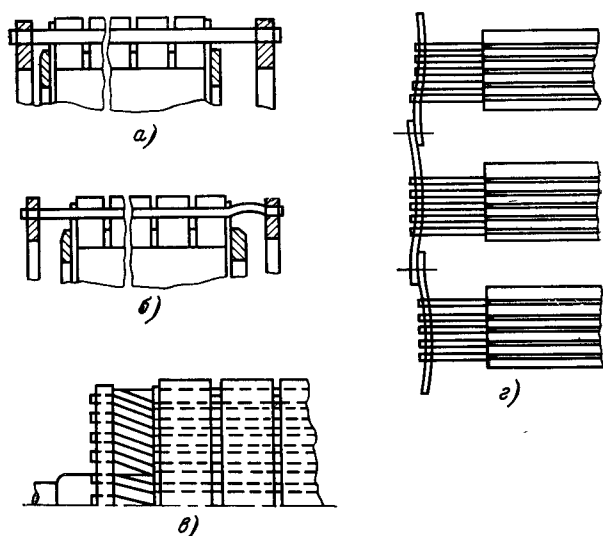


Рис. 26. Виды повреждений беличьих клеток.

и разрывы мест соединений сегментов в пусковых клетках синхронных двигателей.

При профилактическом осмотре короткозамкнутых обмоток следует обращать внимание на повреждения, которые если еще не привели к аварийному выходу двигателя из строя, то в конечном итоге приведут к обрыву стержней или распайке мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами. К таким повреждениям, кроме упомянутых выше трещин стержней, можно отнести:

смещение беличьей клетки, при этом короткозамыкающие кольца с обеих сторон ротора будут находиться на разных расстояниях от активной стали (рис. 26,а);

горбообразный прогиб выступающих из активной стали концов стержней (рис. 26,б). Деформациям такого вида могут быть подвергнуты все или некоторые стержни беличьей клетки. В пусковых клетках синхронных двигателей это явление чаще всего можно наблюдать у крайних на каждом полюсе стержней;

изгиб концов стержней в направлении вращения ротора от усилия скручивания короткозамыкающим кольцом (рис. 26,в). Это явление может иметь место в роторах с большими окружными скоростями и массивными короткозамыкающими кольцами, в особенности если инерция короткозамыкающего кольца увеличивается в значительной степени наличием глухо скрепленного с ним стального бандажного кольца;

волнообразный изгиб расположенных на ребро короткозамыкающих колец (или сегментов) от неравномерного удлинения отдельных стержней. Чаще всего это явление можно наблюдать в пусковых клетках синхронных двигателей, не имеющих торцевого бандажного кольца (рис. 26,г);

наличие цветот побелости на короткозамыкающих кольцах в местах паяных соединений со стержнями, подгары в местах соединений, подгары болтов, соединяющих короткозамыкающие сегменты пусковых клеток синхронных двигателей.

К менее характерным, отдельным повреждениям короткозамкнутых обмоток можно отнести: выпучивание стержней прямоугольного сечения через шлиц паза ротора (наблюдается у некоторых асинхронных двигателей иностранных фирм), разрушение в виде мелкой крошки стальных уплотняющих прокладок в пазах короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами, в результате вибрации стержней в пазах с повышенной частотой и т. п.

Способы обнаружения неисправностей. Все описанные выше виды повреждений беличьих клеток, за исключением трещин и обрывов стержней в пазовой части, можно обнаружить при внимательном осмотре короткозамкнутой обмотки в период профилактического ремонта. Это так называемые начальные повреждения, которые еще не привели к обрыву короткозамкнутой обмотки. Эти повреждения практически не нарушают нормальной работы двигателя, поэтому в процессе работы двигателя ничем себя не обнаруживают.

С особой тщательностью проверяют наличие начальных трещин на выступающих концах стержней, используя при этом все способы обнаружения трещин в металле: оптический (с применением увеличительных стекол), химический (протравливание подозрительных мест реактивами или мелом с керосином), электромагнитный (специальными приборами).

Весьма тщательно осматривают также состояние паяных соединений стержней с кольцами, обращая внимание на самые незначительные изменения мест пайки.

Обрыв одного или двух стержней в процессе работы двигателя не всегда может быть сразу обнаружен эксплуатационным персоналом, так как внешние изменения в работе двигателя могут быть незначительными, в особенности у тихоходных двигателей и двигателей, работающих с запасом мощности. При обрыве даже одного стержня нарушается нормальная работа короткозамкнутой обмотки и, как правило, после сравнительно непродолжительной работы двигателя влечет за собой обрыв других стержней, что приводит к аварийному выходу двигателя из строя.

На наличие в работающей беличьей клетке оборванных стержней указывают следующие признаки:

усиление вибрации двигателя, как следствие возникающей асимметрии магнитных потоков ротора, приводящей к появлению дополнительных сил одностороннего магнитного притяжения, может быть обнаружено приборами — виброметром или индикатором;

появление шума с тоном, не характерным для нормальной работы данного двигателя, а иногда появление прерывистого тока. Появление дополнительного шума также является следствием усилившейся вибрации и нарушения симметрии магнитных потоков;

затяжка или увеличение времени пуска. В некоторых случаях в установках с тяжелым пуском двигатель может вообще не развить номинальной частоты вращения или даже не тронуться с места, если оборвано несколько стержней.

Но, как уже указывалось, очень часто при обрыве одного-двух стержней перечисленные признаки могут быть настолько неявны, что практически по ним обнаружить дефект беличьей клетки чрезвычайно затруднительно. Поэтому при профилактических осмотрах двигателей, в особенности работающих в ответственных

установках, следует производить проверку целостности стержней специальными способами. Кроме того, если даже и удалось по перечисленным выше признакам установить наличие обрыва в беличьей клетке, надо еще определить паз, в котором заложен оборванный стержень.

Ниже приводится несколько способов обнаружения оборванных или имеющих трещину в пазовой части стержней беличьих клеток.

Способ, основанный на измерении изменения магнитного потока рассеяния. При питании стержней беличьей

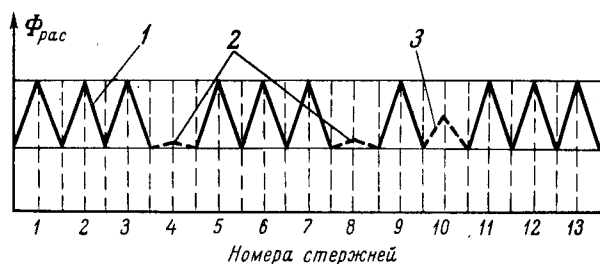


Рис. 27. Схема изменения магнитного потока рассеяния по развертке окружности ротора.

1 — неповрежденный стержень; 2 — оборванный стержень; 3 — трещина стержня.

клетки переменным током от постороннего источника вокруг стержней образуется магнитное поле рассеяния, причем над стержнями, обтекаемыми током, магнитный поток будет иметь максимальное значение, а между пазами над оборванными стержнями — минимальное.

Схема изменения магнитного потока рассеяния показана на рис. 27 на развертке ротора. Как видно из рисунка, при неполном обрыве стержня измеренный магнитный поток рассеяния над этим стержнем будет иметь какое-то промежуточное между максимальным и минимальным значение.

Измерение производится следующим образом:

1) к короткозамыкающим кольцам ротора подводится переменный ток от постороннего источника. Для проверки исправности ротора требуется ток от 10 до 30 А, в качестве источника питания лучше всего использовать понижающий трансформатор 220—127/12 В.

Для роторов малых диаметров подвод питания можно осуществлять к точкам короткозамыкающих колец, расположенным по диагонали бочки ротора, и измерять магнитный поток рассеяния вокруг всей бочки ротора без переноса питания в другие точки.

Для роторов больших диаметров целесообразно подводить питание к точкам колец, расположенным против одного из стержней, измеряя при этом поток рассеяния пяти-шести стержней до и после места присоединения питания. Затем переносят питание на десять — двенадцать стержней и т. д.;

2) измеряют магнитный поток рассеяния по всей окружности бочки ротора над стержнями и между пазами. Для проверки исправности стержней ротора не требуется знание абсолютного значения магнитного потока рассеяния, достаточно определить ее относительное изменение.

Измерение производят прибором типа ВАФ-85 (вольтамперфазоиндикатор). При этом тумблер «величина — фаза» прибора типа ВАФ-85 ставится в положение «величина», переключатель пределов на 1 или 5 А и присоединяется клещевая приставка. В зазор клещевой приставки вставляется какой-либо неферромагнитный предмет толщиной 7 мм. Клещи плоскостью своего разъема устанавливают параллельно стержню непосредственно на бочку ротора и передвигают по образующей всей бочки ротора. Фиксируется показание прибора над каждым стержнем и между пазами. При измерении обе щеки клещевой приставки должны одинаково плотно лежать на бочке ротора;

3) по измеренным значениям магнитного потока рассеяния судят об исправности стержней ротора и определяют места заложения поврежденных стержней подобно тому, как это сделано на рис. 27.

Описанный способ применим для роторов, имеющих различную форму паза (открытый, полужакрытый, закрытый, глубокий, бутылочный и т. п.), и дает возможность достаточно точно определить наличие и место заложения поврежденных стержней.

Затрата времени на проверку ротора, включая и время сборки схемы, не превышает 25—30 мин.

Способ трех амперметров. В три фазы статора включают амперметры, ротор затормаживают, а в статор подают напряжение, которое равно $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$ номинального.

Затем ротор медленно проворачивают и определяют максимальное и минимальное значения тока статора по установленным амперметрам. При исправном роторе ток в статоре во всех положениях ротора будет одинаковым, а при обрыве или плохом контакте будет изменяться в зависимости от положения ротора.

Критерием годности ротора является соотношение

$$\frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}}{I_{\text{макс}} + I_{\text{мин}}} \cdot 100, \%$$

Ротор считается годным, если это соотношение не превышает 3%.

Для нахождения места заложения поврежденных стержней ротор несколько выдвигают из статора и надежно предохраняют от проворачивания.

На каждый паз выступающей части ротора поочередно накладывают тонкую стальную пластину, перекрывающую два зубца ротора. При нахождении пластинки над пазами, в которых нет стержней с обрывом, она будет притягиваться и дребезжать. Как только пластинка перекроет паз с поврежденным стержнем, притяжение и дребезжание станут значительно слабее или вовсе исчезнут. Во избежание перегрева обмоток опыт следует производить достаточно быстро.

Этот способ интересен тем, что не требует специальных приборов, поэтому доступен в любых эксплуатационных условиях.

Следует заметить, что проведение измерений по первой части данного способа требует строгого центрирования ротора относительно статора. Неравномерность зазора делает показания приборов сомнительными. При наличии нескольких разорванных стержней, которые расположены симметрично по окружности ротора (вообще-то случай весьма редкий), разность показаний амперметров может оказаться незначительной, хотя ротор совершенно не пригоден к работе.

Учитывая последние соображения, не ограничиваются проверкой методом трех амперметров, но даже в случае получения благоприятных результатов производят проверку на притяжение пластинки.

Магнитная порошковая дефектоскопия. Сущность способа магнитной порошковой дефектоскопии заключается в следующем: от понижающего трансформатора

к короткозамыкающим кольцам ротора подводится напряжение 1,5—2,5 В. Изменяя первичные напряжения, устанавливают во вторичной цепи ток 300—500 А. Вторичная обмотка трансформатора, соединительные провода и контактные поверхности на короткозамыкающих кольцах ротора должны быть рассчитаны на такой ток. Ток при прохождении по параллельно включенным стержням роторной клетки создает вокруг каждого

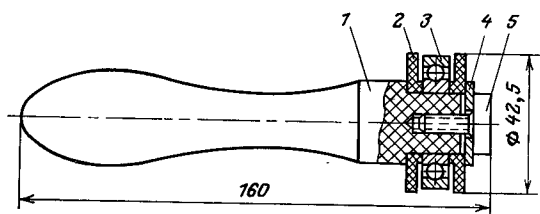


Рис. 28. Дефектоскоп для проверки стержней беличьей клетки.

стержня магнитное поле. Ротор обертывают плотным листом белой бумаги, который покрывают тонким слоем стальных опилок. Они расположатся плотной линией вдоль целых стержней и менее плотно вдоль стержней, имеющих разрывы.

Для определения повреждений стержней короткозамкнутых обмоток роторов можно рекомендовать следующие приборы, которые можно сравнительно легко изготовить своими силами.

1. *Дефектоскоп* (рис. 28) состоит из шарикоподшипника 3, плотно насаженного на текстолитовую или гетинаксовую ручку 1. Внутреннее кольцо шарикоподшипника зажимается двумя текстолитовыми дисками 2 при помощи винта 5 и шайбы 4. Диаметр дисков 2 на 0,5 мм больше диаметра наружного кольца шарикоподшипника.

Проверяемый ротор на $\frac{1}{3}$ длины помещают в расточку статора. К обмотке статора подводится регулируемое напряжение переменного тока, равное 20—25% номинального.

При проверке стержней обмотки дефектоскоп устанавливают опорными текстолитовыми дисками 2 на сердечник ротора и обходят им окружность сердечника ротора. Под влиянием магнитного поля рассеяния, созда-

ваемого током, проходящим через стержни, верхнее кольцо подшипника будет вращаться, а при проходе через зону оборванными стержнями — остановится. При испытании, чтобы добиться вращения кольца подшипника, может возникнуть необходимость несколько изменить напряжение, проводимое к обмотке статора.

2. *Прибор трансформаторного типа* (рис. 29) состоит из трансформатора с разомкнутым магнитопроводом 1, на котором намотана намагничивающая обмотка 2, питаемая напряжением переменного тока 220 В. Принцип работы прибора основан на изменении тока в обмотке трансформатора, для измерения которого предусматривается амперметр 3.

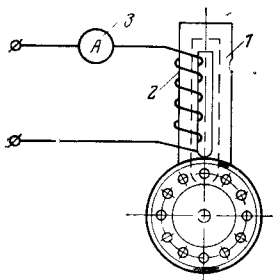


Рис. 29. Прибор трансформаторного типа для проверки стержней беличьей клетки.

Магнитопровод 1 с сердечником ротора образует замкнутый магнитный контур. При обходе прибором окружности сердечника ротора один из стержней поочередно является вторичной обмоткой трансформатора. Если стержень исправный, то эта вто-

ричная обмотка замкнута накоротко, и в первичной обмотке трансформатора 2 будет проходить ток короткого замыкания. Если же в стержне есть обрыв, то в первичной обмотке трансформатора будет проходить меньший ток (ток холостого хода), что и будет фиксироваться амперметром 3.

При изготовлении прибора руководствуются следующим: обмотка 2 состоит из 7000 витков провода марки ПЭЛ диаметром 0,07 мм, а сечение магнитопровода 100—120 см².

3. *Прибор трансформаторного типа с гибким магнитопроводом* (рис. 30). Прибор является более совершенным по сравнению с предыдущим прибором трансформаторного типа.

Магнитопровод 4 составлен из двух U-образных магнитопроводов, склеенных между собой клеем БФ2 или эпоксидным клеем и изогнутых таким образом, что в собранном виде образуют Ш-образный магнитопровод. Каждый из U-образных магнитопроводов набран из 40 полос электротехнической стали Э340 толщиной 0,1 мм,

длиной 260 мм и шириной 40 мм и достаточно эластичен.

На среднем стержне магнитопровода установлен датчик-катушка 1, выполненная проводом ПЭЛ, диаметром 0,29 мм, с числом витков 4000 и питаемая переменным током 220 В. На каждом крайнем стержне магнитопровода установлены измерительные катушки 5, намотанные проводом 0,15 мм, с числом витков 4000 и включен-

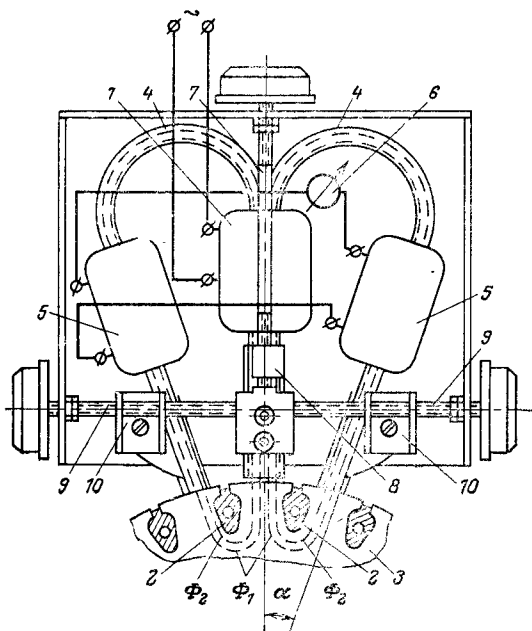


Рис. 30. Прибор трансформаторного типа с гибким магнитопроводом для проверки стержней беличьей клетки.

ные встречно через индикатор 6 (вольтметр типа ЛВ-9). Прибор устанавливается на проверяемом роторе 3.

При пропускании тока через катушку 1 возникает магнитный поток Φ_1 , который охватывает стержни 2 беличьей клетки.

Если стержни 2 не имеют обрыва или других обрывов — обладают одинаковым активным сопротивлением, то токи, наведенные в стержнях 2 и создаваемые или магнитные потоки реакции Φ_2 , будут одинаковы. Если

же один из стержней 2 имеет дефект, то его активное сопротивление увеличится и ток, проходящий через него, уменьшится. В связи с этим в крайних стержнях магнитопровода 4 будут разные по значению результирующие магнитные потоки.

Так как расположенные на крайних стержнях измерительные обмотки 5 имеют одинаковое количество витков и они включены встречно, то при отсутствии дефекта в сравниваемых стержнях 2 результирующая э. д. с. в цепи индикаторного прибора будет равна нулю. При наличии дефекта в стержне э. д. с. в измерительных обмотках 5 не будут компенсировать друг друга и на индикаторный прибор 6 будет воздействовать результирующая э. д. с., значение которой тем больше, чем значительнее дефект в стержнях.

В зависимости от диаметра ротора и зубцового деления изменяется угол α и положения среднего и крайних стержней магнитопровода. Для перемещения среднего стержня магнитопровода по вертикали — вверх или вниз служит винт 7 и ходовая муфта 8. Крайние стержни магнитопровода (благодаря своей эластичности) могут перемещаться вправо или влево винтами 9 и муфтами 10.

Основные причины повреждения беличьих клеток. Причинами повреждений беличьих клеток являются повышенные механические напряжения в материале стержней, колец и паяных соединений, возникающие в результате действия центробежных сил, сил инерции короткозамыкающих колец и вибрации стержней, а также в результате температурных факторов от действия проходящего тока.

В результате образования электрической дуги под действием проходящего тока происходят распайки и оплавления мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами.

Разрывы элементов беличьих клеток от действия центробежных сил — явление нечастое, так как механические напряжения от их действия могут быть рассчитаны конструктором с достаточной точностью. На основании произведенного расчета выбирается конструкция, материал и размеры стержней и колец.

Особо следует обратить внимание на прочность короткозамыкающих колец в короткозамкнутых асинхронных двигателях, реконструируемых с переводом на но-

вую (повышенную) частоту вращения, когда ограничиваются лишь заменой статорной обмотки, а беличью клетку оставляют без изменения, и в короткозамкнутых асинхронных двигателях, переделываемых из двигателей с контактными кольцами силами ремонтного персонала на местах установки двигателя.

Для расчета механических напряжений (МПа), возникающих в короткозамыкающих кольцах под действием центробежных сил, пользуются формулой

$$\sigma = 2,8 D_k n_c^2 \gamma \cdot 10^{-9}, \quad (14)$$

где D_k — средний диаметр кольца; м; n_c — синхронная частота вращения двигателя, об/мин; γ — плотность материала кольца, г/см³.

Формула (14) действительна для сплошных колец, не ослабленных пазами под стержни. Если для кольца, имеющего пазы, принять, что на растяжение работает лишь мостик f (рис. 31), то механическое напряжение в нем

$$\sigma_f = \sigma \frac{b_k}{f},$$

где b_k — радиальная толщина кольца, мм; f — высота мостика, мм.

При конструировании клеток высота мостика f должна быть выбрана таким образом, чтобы механические напряжения в нем не превышали 22 МПа для меди марок М2 и М3 и 80 МПа для стали марки ст3.

Явление скручивания, проворота короткозамыкающих колец, сопровождающееся изгибом стержней (см. рис. 26, в), может иметь место в высокоскоростных двигателях с массивными короткозамыкающими кольцами и насаженными на них стальными бандажными кольцами. В эксплуатации такие случаи наблюдались у большого количества асинхронных двигателей типа КАО350-2; $n = 2980$ об/мин.

Объяснить это явление можно следующим образом. В процессе разгона двигателя под нагрузкой, а также в период рабочего режима при номинальной частоте вращения в момент резко увеличивающейся нагрузки на

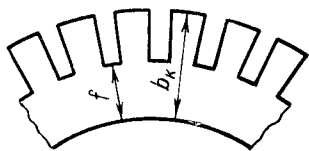


Рис. 31. К расчету механических напряжений в короткозамыкающем кольце.

валу двигателя бочка ротора с заложенными в ней стержнями беличьей клетки подвергается динамическим силам резкого торможения. Это торможение на короткозамыкающие кольца передается через выступающие концы стержней таким образом, если сила инерции вращающихся с большой скоростью массивных колец будет больше сопротивления изгибу концов стержней, то кольцо как бы повернется относительно бочки ротора и изогнет выступающие концы стержней в месте их выхода из бочки. При сравнительно коротких выступающих концах стержней их жесткость и сопротивление изгибу увеличиваются. В этом случае может произойти отрыв концов стержней от кольца.

Выше упоминалось о явлении вибрации стержней беличьей клетки с повышенной частотой (для двигателей, работающих на промышленной частоте 50 Гц, частота вибрации стержней около 100 Гц). Это явление обусловлено совместными факторами вращения ротора и действия магнитного поля двигателя на проводник с током. Естественно, вибрации подвержены стержни, которые слишком свободно размещены в пазах ротора.

В результате вибрации возможно выкрашивание металлических уплотняющих прокладок в пазах короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами, а также возможен отрыв от короткозамыкающих колец в результате усталостных перенапряжений материала стержней в сечении, примыкающем к кольцу.

Главными факторами повреждения короткозамкнутых клеток следует считать деформации и разрывы деталей клеток от механических перенапряжений в результате действия высоких температурных нагревов стержней и колец в процессе пуска двигателя. Как показала эксплуатация синхронных и асинхронных двигателей, на промышленных предприятиях и электростанциях 80% всех повреждений короткозамкнутых обмоток являются следствием этого фактора, причем наиболее тяжелым в этом отношении является период пуска двигателя, когда происходит очень быстрый и неравномерный нагрев клетки. Температура в отдельных частях ее у некоторых двигателей достигает 400—500°C.

Положение усугубляется еще и тем, что существующие методы расчета пусковых перегревов короткозамк-

нутых обмоток, применяемые при проектировании двигателей, в целом ряде случаев не дают правильной картины роста и распределения температур в процессе пуска. Кроме того, конструктору не всегда известен весь перечень производственных механизмов, с которыми должен работать данный двигатель. Например, двигатели, рассчитанные на легкий пуск, иногда работают в установках с тяжелым пуском. Известны случаи, когда на некоторых цементных заводах мощные синхронные двигатели с расчетным начальным пусковым моментом $M_{н.п.} = 0,4 M_n$, рассчитанные на легкий пуск при холостом ходе производственного механизма, работали приводами цементных мельниц и по условиям производства часто должны были запускаться при полной нагрузке. В результате этого наблюдается регулярный выход из строя пусковых клеток.

Особенно неблагоприятным режимом для короткозамкнутой обмотки (и для обмотки статора двигателя) являются повторные пуски из горячего состояния. В этом случае перегревы обмоток достигают наивысших значений, в особенности в двигателях с тяжелым пуском. В эксплуатации отмечены различные виды повреждений беличьих клеток в результате повышенных перегревов в зависимости от типа короткозамкнутой обмотки и ее конструктивно-технологического исполнения. Так, у двигателей с глубоким пазом лопаются или вырываются из колец стержни или происходит поломка самих колец. При пуске глубокопазных двигателей ток в роторных стержнях оттесняется к открытой стороне паза. Неравномерное распределение тока по сечению стержней вызывает их неравномерный нагрев. Перепады температуры по высоте стержня тем выше, чем больше его высота и пусковая плотность тока. У стержней высотой 35—40 мм при начальной пусковой плотности тока порядка 40—48 А/мм² разность температуры между верхним и нижним слоями стержня может достигнуть при пуске 100—150°C.

Если бы стержень свободно лежал в пазу, то при неравномерном его нагреве более горячие верхние слои удлинились бы больше, чем нижние, при этом стержень изогнулся бы.

Если стержень сидит в пазу плотно, то изогнуться он не может, вследствие чего в нем образуются механические напряжения: верхние слои оказываются сжаты-



с разных сторон бочки ротора, что следует считать особенно неблагоприятным.

В пусковых клетках синхронных двигателей, кроме перечисленных технологических факторов, способных привести к повреждению беличьей клетки, действует еще и специфический фактор неравномерного распределения тока в стержнях каждого полюса (в крайних стержнях ток больше, чем в средних), что может привести к изгибу кольца (см. рис. 26,з) или к обрыву стержней.

Распайки и оплавления мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами, как правило, не являются следствием конструктивных дефектов беличьих клеток, так как в большинстве конструкций расчетная площадь контакта стержня с короткозамыкающим кольцом или сегментом вполне достаточна и должна обеспечивать нормальную работу места соединения при прохождении по нему пусковых токов. Причиной распаяк и оплавлений, как правило, является нарушение технологии пайки: неправильная подготовка места соединения под пайку, не обеспечивающая полного заполнения припоем зазора между стержнем и пазом под стержень в короткозамыкающем кольце; неудачный выбор припоев и флюсов; неправильный выбор средств разогрева при пайке и т. п.

Следует отметить, что результатом нарушения технологии пайки могут быть и обрывы стержней в месте входа в короткозамыкающее кольцо — это происходит в случае пережога концов стержней при завышении температуры разогрева при пайке.

На снижение механической прочности и обрывы концов стержней в указанных местах влияет также выбор припоя. Так, в соединениях II категории, испытывающих повышенные механические напряжения при пусковом и рабочем режимах, рекомендуется применять серебряные припои марок ПСр45, ПСр25 и реже ПСр15. Ремонтники-эксплуатационники часто задают такой вопрос. Почему для указанных соединений (II категории) не рекомендуется применять медно-фосфористый припой, который весьма технологичен, хорошо заполняет зазор между стержнем и кольцом, надежно сцепляет материалы стержня и кольца и обеспечивает монолитную структуру места соединения. Случаи распайки беличьих клеток или оплавления мест соединения, запаянных медно-фос-

фористым припоем, — явление чрезвычайно редкое. Все это вполне справедливо. Но неприятность заключается в том, что даже при полном соблюдении технологии при пайке медно-фосфористым припоем происходит фосфоризация довольно толстого слоя концов стержней в месте, примыкающем к кольцу, в результате резко снижается механическая прочность стержней в этих местах.

Из сказанного выше о конструктивных и технологических дефектах беличьих клеток, способствующих их повреждению в процессе эксплуатации, конечно, не следует, что все двигатели, имеющие какие-либо из этих дефектов, обязательно должны выйти из строя. Повреждаются только те работающие в тяжелых механических и тепловых режимах короткозамкнутые обмотки, в которых указанные дефекты наиболее ярко выражены. Большинство же короткозамкнутых обмоток работает нормально без повреждений довольно длительные сроки.

При определении причин повреждения беличьих клеток следует иметь в виду, что данное повреждение могло явиться результатом совместного действия основных факторов. В особенности это касается наиболее частого вида повреждения — обрыва стержней в месте присоединения к короткозамыкающему кольцу.

После ознакомления с анализом возможных причин повреждения короткозамкнутых клеток становится ясным, как важно, прежде чем приступить к ремонту клетки, установить эти причины.

4. РЕМОНТ БЕЛИЧЬИХ КЛЕТОК

Виды ремонта. Ремонт короткозамкнутых клеток на месте эксплуатации на предприятиях в зависимости от причин и степени повреждения, а также с учетом производственных условий, связанных с восстановлением и вводом в эксплуатацию поврежденного двигателя, может быть либо частичным, либо с полной заменой беличьей клетки.

Невозможно дать исчерпывающие рекомендации для определения объема ремонта для всех случаев повреждения беличьих клеток, ибо это зависит от многих усло-

вий. Но во всяком случае решение о частичном ремонте следует принимать лишь в тех случаях, когда повреждение явилось результатом отдельных дефектов, не характерных для узлов и деталей всей клетки, например, распайки отдельных мест соединения стержней с короткозамыкающим кольцом вследствие некачественной пайки в этих местах; деформация или обрыв одного-двух стержней, если обнаружена слишком слабая или слишком тугая посадка их в пазах ротора; замена поврежденных деталей, соединяющих короткозамыкающие сегменты в пусковых клетках синхронных двигателей, и др. Ниже будут приведены проверенные ремонтной практикой способы ремонта двигателей.

При ремонте часто приходится прибегать к полной замене беличьей клетки, тем более что в условиях современного оснащения ремонтных цехов предприятий изготовление новых стержней простых профилей (круглых, прямоугольных) и короткозамыкающих колец не представляет собой трудности. В связи с этим необходимо дать общие рекомендации по основным операциям изготовления короткозамкнутых клеток, к каким отно-

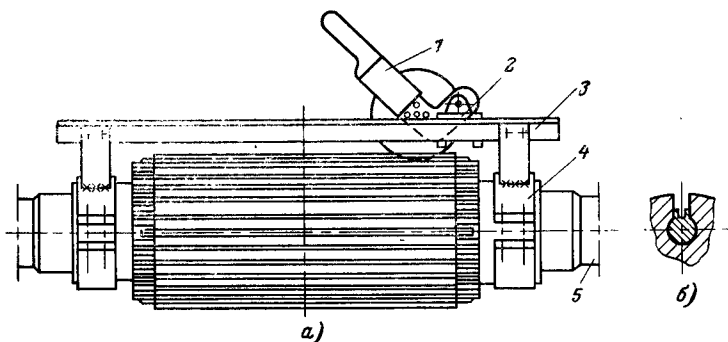


Рис. 32. Прорезание щели в бутылочном стержне.

а — установка приспособления на роторе; б — стержень с прорезанной щелью.

сятся удаление стержней из пазов, изготовление стержней, изготовление короткозамыкающих колец, пайка мест соединений стержней с короткозамыкающими кольцами.

Удаление стержней из пазов. При частичной или полной замене стержней удаление их из пазов может в некоторых случаях представить значительные трудности.

Удаление из пазов стержней бутылочного профиля, плотно посаженных в паз за счет их расчеканки по всей длине ротора (рис. 6) обычным способом — выбиванием их кувалдой через набор металлических выколоток, может привести к тому, что стержень, пройдя некоторое расстояние от ударов, расклинится в пазу и окончательно в нем застрянет. Удалить такой стержень из паза можно только высверловкой сверлами с удлиненными хвостовиками.

Успешно применяется следующий способ удаления стержней из пазов ротора.

Приспособлением 1 (рис. 32) для резки труб вулка-

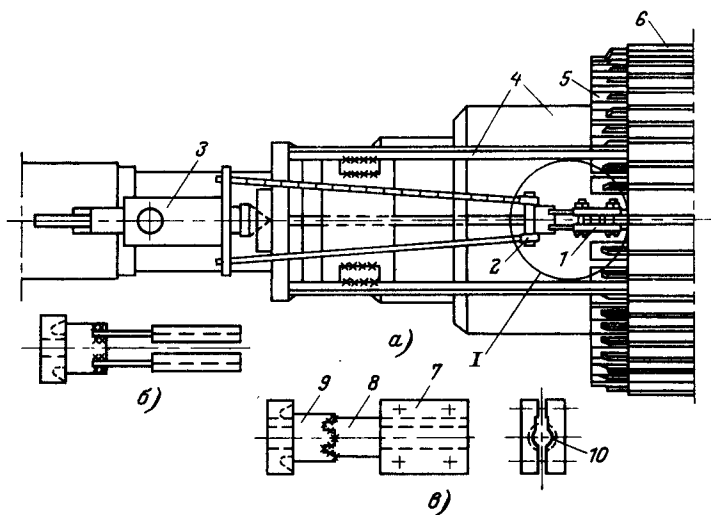


Рис. 33. Извлечение стержней из роторного паза.

а — собранное приспособление на роторе электродвигателя; *б* — крепежный зажим-захват (узел 1); *в* — вид с торца на зажим; 1 — собранный зажим; 2 — захват; 3 — домкрат; 4 — кронштейны-распорка; 5 — стержни роторного паза; 6 — бочка ротора; 7 — зажим; 8 — соединительная планка; 9 — втулка для захвата; 10 — отверстие в зажиме по форме стержня с крепежной резьбой М22×2,5 мм.

нитовым камнем, установленным на каретке 2, перемещающейся в направляющих уголках 3, прикрепленных посредством хомутов 4 к валу ротора 5, прорезается щель шириной 2—3 мм в расчеканенной прямоугольной части стержня и таким образом стержень раскрепляется в пазу. Затем стержень выбивается на длину около 50—

70 мм, необходимую для захвата стержня зажимом (рис. 33), и на выступающий из ротора конец стержня устанавливается зажим 1, через который захватами 2 гидродомкрата 3, установленного на кронштейне-распорке 4, производится извлечение стержня из паза. Весьма часто протянутый на некоторое расстояние стержень настолько ослабевает, что становится возможным удалить его из паза легкими ударами кувалды по зажиму.

Изготовление стержней. В § 2 были приведены основные материалы, применяемые для изготовления стержней и колец беличьих клеток как для пусковых, так и для рабочих обмоток. В зависимости от требуемых размеров изготавливают стержни круглого или прямоугольного профиля соответственно из прутковых или полосовых, листовых и шинных заготовок. Стержни бутылочного, трапецеидального профиля изготавливать на предприятиях слишком затруднительно. При ремонте комплект таких стержней лучше всего получить непосредственно с завода — изготовителя двигателя.

Изготовление короткозамыкающих колец. В соответствии с установленными категориями прочности для

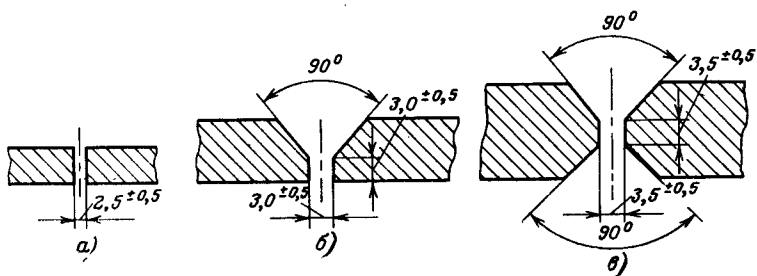


Рис. 34. Механическая обработка заготовок короткозамыкающих колец под сварку.

а — заготовки толщиной до 6 мм; *б* — заготовки толщиной от 6 до 12 мм; *в* — заготовки толщиной больше 12 мм.

обмоток с окружной скоростью выше 50 м/с используют цельные медные или латунные кольца, изготовленные из прокованных заготовок. И только кольца диаметром больше 800 мм и толщиной до 20 мм допускается (после проведения соответствующего расчета на прочность) изготовить сварными с одним или двумя стыками.

Для короткозамкнутых обмоток с соединениями III категории прочности (испытывающих более низкие механические нагрузки) допускается использование сварных медных и латунных колец, имеющих четыре, а иногда и более стыков.

Для того чтобы произвести надежную сварку частей короткозамыкающего кольца, необходимо правильно обработать кромки заготовок под сварку. На рис. 34 показана обработка кромок в зависимости от толщины заготовок.

Соединение частей короткозамыкающего кольца производится газовой сваркой. Присадочные материалы и флюсы для газовой сварки выбирают по табл. 8.

Таблица 8

Материал заготовки	Присадочная или сварочная проволока или прутки		Флюс
	Материал	Марка	
Медь	Медь	М1 или МЗС (ГОСТ 859-66)	Бура техническая обезвоженная (ГОСТ 8429-69) Натрий хлористый (ГОСТ 4233-66) Кислота борная (ГОСТ 18704-73)
Латунь	Латунь	ЛОК 59-1-0,3 (СТУ30533-64) Л63 (ГОСТ 15527-70)	

Из приведенных в табл. 8 марок присадочной проволоки для сварки латуни предпочтительнее проволока ЛОК59-1-0,3, которая способствует повышению прочности свойств сварных соединений за счет минимального выгорания цинка.

Диаметр присадочной проволоки в зависимости от толщины свариваемых заготовок колец рекомендуется выбрать в зависимости от толщины свариваемых заготовок колец:

Толщина заготовок колец, мм . . .	До 4	5—8	9—12	13—20	Свыше 20
Диаметр присадочной проволоки, мм	3	5	6	8	8—10

Непосредственно перед сваркой заготовки колец и прутки присадочной проволоки подвергают обезжириванию и травлению. Обезжиривание может быть *местным*,

когда обезжиривают только свариваемые кромки заготовок и непосредственно прилегающие к ним участки шириной 40—50 мм, и *полным*, когда детали целиком промываются в специальном баке, заполненном обезжиривающим составом.

Для обезжиривания применяется один из следующих растворителей: бензин авиационный марки Б-70, бензин-растворитель для лакокрасочной промышленности, уайт-спирит (ГОСТ 3134-52), ацетон технический.

Местное обезжиривание производится смоченной в растворителе чистой ветошью. Участок, подлежащий обезжириванию, протирают не менее 3—4 раз. Перед обезжириванием детали протирают чистой ветошью для снятия грязи.

После обезжиривания свариваемые кромки подвергают травлению. Для травления наиболее часто используют концентрированную азотную кислоту с содержанием 250—350 г/л (ГОСТ 701-68). Температура раствора комнатная, а время травления 15—30 с; натрий хлористый (ГОСТ 4223-75) с содержанием 1,5—2,5 г/л, температура раствора комнатная, а время травления 3—10 мин.

После травления заготовки колец присадочные материалы тщательно промывают в горячей воде, а затем протирают волосяными щетками и просушивают в сушильном шкафу при температуре 100—120°C. Сушку можно производить и горячим воздухом (воздуходувкой), очищенным от влаги и пыли.

Сварку производят не позднее чем через 8 ч после травления. В противном случае перед сваркой необходимо произвести механическую зачистку свариваемых кромок стальной щеткой, напильником или стеклянной шкуркой. Не рекомендуется производить очистку с помощью абразивов наждачной бумаги, после механической зачистки повторяют травление свариваемых кромок.

Сварку выполняют ацетилено-кислородным пламенем, применяя присадочную проволоку и флюс согласно табл. 8. Для получения надежного соединения при изготовлении сварных короткозамыкающих колец рекомендуется придерживаться следующих выработанных практикой правил:

1. Сварку медных или латунных заготовок толщиной от 15 до 25 мм с одним стыком в кольце производят го-

релкой мощностью 2500 л ацетилен в 1 ч. При меньшей толщине заготовок мощность горелки берут из расчета 200 л ацетилен в 1 ч на 1 мм толщины для заготовок из меди и 130 л в 1 ч для заготовок из латуни.

Сварку заготовок толщиной более 25 мм лучше производить сразу двумя горелками, одну из которых используют для прогрева и поддержания температуры заготовки, а вторую для сварки. Кольца с двумя стыками варят двумя горелками сразу в двух стыках.

2. В стыке заготовок выдерживают зазор (рис. 34). Для этой цели внутрь заготовки вставляют распорную планку, которую удаляют после заварки разделки с одной стороны.

3. Заполнение разделки присадочным металлом начинают сразу же после оплавления кромок и доводят до получения выпуклого шва.

После заварки одной стороны разделки производят подрубку, зачистку и разварку корня первого шва. Затем аналогичным путем заполняют присадочным металлом вторую и боковые стороны разделки.

Увеличение толщины короткозамыкающего кольца после сварки за счет усиления сварочного шва не должно превышать 20% толщины свариваемой заготовки.

4. После сварки медные кольца проковывают при температуре не ниже 650°C и охлаждают водой.

Ковка латунных колец производится при температуре, не превышающей 500°C. Проковка швов производится стальным молотком массой 300 г с круглым бойком.

5. После проковки выполняют отжиг сварных швов путем нагрева колец горелками до 550—600°C и охлаждение. Медные кольца охлаждают быстро, поливая водой, а латунные — медленно при комнатной температуре.

6. После охлаждения кольцо обрабатывают по внешнему и внутреннему диаметрам и по плоскостям.

Качество сварки проверяют обычными методами, применяемыми при сварочных работах. Особо тщательно внешним осмотром проверяют швы после проковки и после механической обработки, для этого применяют лупы с многократным увеличением.

В отдельных случаях при ремонте изготавливают наплавленные медные короткозамыкающие кольца (рис. 20,з). Изготовление наплавленных колец значи-

тельно проще, чем колец с нарезными пазами, и производится в следующей последовательности:

1. Заготавливают полосу толщиной 4—5 мм из шинной или листовой меди шириной, несколько большей, чем осевая толщина кольца, и длиной, равной длине окружности кольца (по внутреннему диаметру).

2. Согнутую в кольцо полосу-заготовку вставляют под концы стержней беличьей клетки.

3. На кольцо наплавляют медь так, чтобы были заполнены все промежутки между концами стержней и чтобы последние были покрыты сверху медью на 3—5 мм.

В качестве присадочного материала применяют отожженную медную проволоку диаметром 3—4 мм, скрученную вдвое. Расплавление проволоки и нагрев концов стержней производят газовой горелкой № 5 или 6.

4. Кольца протачивают на токарном станке.

Пайка соединений роторных стержней с короткозамыкающими кольцами является наиболее ответственной при ремонте операций. Несоблюдение технологии пайки или неправильный выбор припоев и флюсов для разного вида соединений снижает надежность паяного соединения и часто является причиной выхода двигателя из строя. Основные типы припоев, применяемых при пайке медных или латунных стержней с медными или латунными кольцами, приведены в табл. 9.

Для двигателей, работающих в тяжелых условиях пуска, когда имеют место большие температурные напряжения в месте соединения стержня с короткозамыкающим кольцом, рекомендуется применять серебряные припои, а также комбинированную пайку медно-цинковым и медно-фосфористым припоем.

Для пайки беличьих клеток двигателей со сравнительно легкими условиями пуска, в особенности если и стержни и кольца медные, применяют медно-фосфористый припой.

В последнее время в целях экономии серебра проверено на практике и допускается применение припоя марки МФЗ с прибавкой 3% серебра или 8% припоя марки ПСр45 для пайки соединений II категории. В качестве флюса при этом используется бура.

Для всех приведенных в табл. 9 припоев и вариантов соединения медных и латунных стержней с медными и

Припой	Марка	Химический	
		Серебро	Медь
Серебряный	ПСр45	$45 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$
	ПСр25	$25 \pm 0,5$	$40 \pm 1,0$
Медно-фосфористый	ПМФ7	—	Остальное
Медно-цинковый	ЛОК 59-1-0,3—	—	58 ± 60
	или Л63	—	62 ± 65

латунными кольцами в качестве флюса применяют буру. Исключение составляет только пайка медно-фосфористым припоем медных стержней с медными кольцами — в этом случае никакого флюса не требуется.

При пайке меди серебряными припоями иногда пользуются флюсом № 209. Несмотря на то, что флюс этот весьма технологичен, применение его является нежелательным, так как при пайке образуются гигроскопичные шлаки, которые подлежат удалению путем кипячения соединения в воде. В противном случае применение флюса № 209 может привести к коррозионному разрушению обмоток.

Концы стержней короткозамкнутой обмотки, отверстия в кольцах под круглые стержни и пазы в кольцах

под прямоугольные стержни необходимо подготовить к пайке. На рис. 35 показана обработка концов круглых и прямоугольных стержней. Концы стержней бутылочной и трапецеидальной форм обрабатывают соответственно как круглые, так и прямоугольные (специ-

альный профиль стержни имеют только в пазовой части). Механическая обработка под пайку короткозамыкающих колец показана на рис. 36, а взаиморасположение собранных для пайки элементов короткозамкнутой обмотки — на рис. 37. Зазоры в соединениях α (рис. 37)

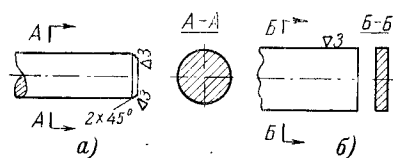


Рис. 35. Механическая обработка концов стержней под пайку.

a — круглые стержни; b — прямоугольные стержни.

Таблица 9

состав, %					Температура расплавления, °С
Фосфор	Цинк	Олово	Кремний	Всего примесей не более	
—	25+1,0 —1,5	—	—	0,5	725
—	35+1,5 —2,0	—	—	0,5	775
7,0±8,5	—	—	—	1,0	800
—	} Остальное	0,7—1,1	0,2—0,4	0,3	905
—		—	—	0,5	905

при пайке серебряными припоями должны быть 0,1—0,2 мм; а для медно-фосфористого припоя марки ПМФ7—0,2—0,25 мм.

Непосредственно перед пайкой стержни и кольца подвергают местному или полному обезжириванию и травлению точно так же, как это было описано выше.

Пайку роторных стержней с короткозамыкающими кольцами осуществляют газовой и электроконтактной пайкой.

Электроконтактная пайка основана на контактном электродуговом нагреве мест пайки и интересна тем, что дает возможность максимально механизировать процесс пайки, повысить производительность труда при хорошем качестве пайки. Но так как электроконтактная пайка требует специального довольно сложного оборудования, пользоваться ей в условиях ремонта двигателей на местах эксплуатации приходится редко.

Наиболее распространенной при ремонте является газовая пайка. Пайку выполняют ацетилено-кислородным пламенем горелкой мощностью около 2000 л ацетилена в 1 ч. Для подогрева и поддержания температуры массивных деталей используют отдельную горелку.

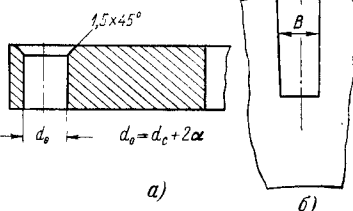


Рис. 36. Механическая обработка пазов в короткозамыкающих кольцах под пайку.

а — для круглых стержней; б — для прямоугольных; $B = b + 2\alpha$; b — толщина стержня (на рисунке не показано).

Для получения надежного паяного соединения рекомендуется придерживаться следующих выработанных практикой правил:

1. Ротор под пайку устанавливают горизонтально при стержнях (концах) прямоугольного сечения и вертикально при круглых концах стержней. При этом необходимо предусмотреть возможность легкого вращения ротора при переходе от одной пайки к другой.

2. Для обеспечения необходимого зазора между активной сталью и короткозамыкающими кольцами

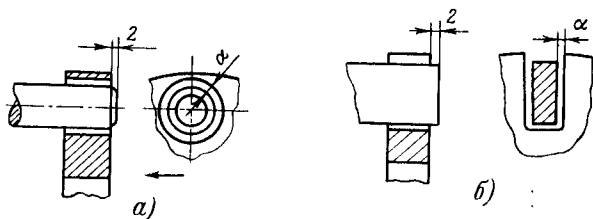


Рис. 37. Взаиморасположение собранных для пайки элементов беличьей клетки.

a — круглые стержни; *б* — прямоугольные стержни.

устанавливают дистанционные клинья из нержавеющей стали.

3. После общего разогрева кольца и стержней расплавление припоя производят путем касания им наиболее нагретых мест пайки на наружной поверхности кольца. Не допускается плавление припоя в самом пламени.

4. Горелку с пламенем все время сохраняют в движении. Флюс наносят на спаиваемые поверхности рукой и прутом припоя, погружая разогретый конец прутка в сосуд с флюсом.

5. Пайку стержней по окружности кольца ведут в следующей последовательности: припаивают два диаметрально противоположных стержня, а затем следующую пару стержней, отстоящую от первой на 90° , и т. д., пока не будут запаяны все стержни на одном кольце. Затем ротор поворачивают на 180° и повторяют пайку на втором кольце.

6. По окончании пайки всех соединений места пайки зачищают, опиливают или аккуратно срубают наплывы припоя.

7. При комбинированной пайке медно-цинковым и медно-фосфористым припоями пайку начинают со стороны раззенковки на наружной поверхности кольца медно-цинковым припоем (как более тугоплавким). Припой должен полностью заполнить раззенковки. После выполнения пайки со стороны раззенковок поворачивают ротор на 180° и паяют медно-фосфористым припоем с внутренней стороны короткозамыкающего кольца. Механическая обработка кольца под комбини-

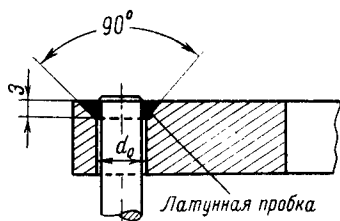


Рис. 38. Пайка с применением латунной пробки.

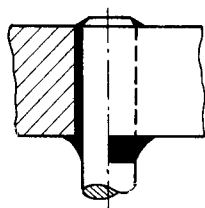


Рис. 39. Образец паяного соединения.

рованную пайку (рис. 38) несколько отличается глубиной зенковки от зенковки при пайке припоем одной марки.

8. Проверку качества пайки производят внешним осмотром с лупой 4—6-кратного увеличения. Валики сварочных швов во внешней и внутренней сторонах короткозамыкающего кольца должны быть выполнены так, как показано на рис. 39.

Ремонт беличьей клетки с использованием старых стержней и короткозамыкающих колец. Такой вид ремонта может быть необходим в случаях отрыва одного-двух стержней от короткозамыкающего кольца или при замене типа припоя в местах соединения, если установлена возможная причина отрыва стержней — неправильный выбор марки припоя. Естественно, оборванные стержни должны быть при этом отремонтированы или заменены новыми.

В практике весьма часто приходится использовать старые стержни и кольца пусковой (верхней) клетки двухклеточных роторов при ремонте рабочей (нижней) клетки, так как для доступа к последней необходимо демонтировать верхнюю клетку (см. рис. 12, ротор типа АТМ).

Для демонтажа ротор устанавливают в вертикальное положение, снимают соединительную муфту и вентилятор с применением обычных приспособлений для стягивания горячо насаженных деталей. Затем производят распайку соединений стержней с верхним короткозамыкающим кольцом. Одновременно происходит прогрев самого кольца до температуры около 800°C , что должно обеспечить свободное его снятие с посадки на нижнее медное кольцо (верхнее стальное короткозамыкающее кольцо в роторах типа АТМ является одновременно и бандажным).

Вертикальное положение ротора обеспечивает отвод тепла при разогреве кольца вверх, тем самым предохраняет от поджогов детали нижней клетки, а в случае одноклеточного ротора — от поджогов активной стали ротора.

Перед нагревом верхнего короткозамыкающего кольца рекомендуется расклинить зазор между верхним и нижним кольцами в шести—восьми местах стальными клиньями. Это предохранит верхнее кольцо от покоробления в процессе нагрева.

После снятия верхнего короткозамыкающего кольца поворачивают ротор на 180° и выполняют те же операции со второй стороны ротора. Положение короткозамыкающих колец относительно пазов ротора маркируют. Перед демонтажем стержней из пазов ротора удаляют с их концов наплывы припоя, которые могут препятствовать выемке при прохождении через пазы. Выбивают стержни очень осторожно, производя удары по концам стержней молотком через деревянные или алюминиевые подбойки во избежание наклепа и расплющивания концов.

Не рекомендуется применять для вытягивания стержней из пазов приспособлений, обеспечивающих значительные усилия, так как стержни могут растянуться и быть непригодными к повторному использованию.

Концы демонтированных стержней и пазы в короткозамыкающих кольцах тщательно очищают от следов старого припоя и обрабатывают под пайку, как это показано на рис. 35 и 36. После необходимого ремонта и подпайки нижней (рабочей) клетки вставляют в пазы ротора стержни верхней клетки. При монтаже стержни должны входить в пазы при легком ударе через деревянную или текстолитовую подбойку молотком массой

около 300 г. Если отдельные стержни идут слишком туго, надо либо опилить выступающие за стенки пазов отдельные листы стали, либо обточить сам стержень. Обычно достаточной будет обработка стержня наждачной, а затем стеклянной шкуркой.

Для опиловки пазов ротора применяют напильники длиной, примерно равной длине активной стали ротора, и формой сечения, соответствующей форме паза. Для удобства работы к обоим концам напильника приваривают стальные прутки; опиловку ведут два человека. Если отдельные стержни слишком свободно вставляются в пазы, их следует заменить новыми.

Вполне допустимо применение восстановленных путем спайки серебряным припоем марок ПСр45 и ПСр70 оборванных стержней. Не следует ремонтировать стержень, имеющий трещины, путем заплавления последних припоем. Такие стержни распиливают по месту трещины, а затем обрабатывают концы под пайку и спаивают заново.

Рекомендуется вставлять все стержни в пазы ротора одновременно, постепенно подбивая диаметрально расположенные стержни. В противном случае, если вставлять стержни по окружности, поочередно вводя каждый стержень на всю длину бочки ротора, возможен сдвиг (поворот) отдельных листов активной стали ротора. Это приведет к тому, что оставшиеся последними незаполненные пазы ротора как бы сузятся и вставить в них стержни будет невозможно.

Пайку стержней с кольцами начинают с внутренней стороны кольца, для чего устанавливают ротор вертикально спаиваемым кольцом вниз. Следует заметить, что после механической обработки концов стержней и пазов короткозамыкающих колец под пайку зазор a (см. рис. 37) при использовании старых стержней и колец может оказаться несколько большим, чем это рекомендуется для пайки новых деталей, и может достигать до 0,5—0,6 мм.

Для того чтобы припой не утекал через сравнительно большой зазор, рекомендуется применять комбинированную пайку с так называемой «латунной пробкой» (см. рис. 38). Раззенковка внешнего торца короткозамыкающего кольца (делается несколько более глубокой, как для комбинированной пайки) заполняется латуной, имеющей температуру плавления более 900° С. При

этом латунь образует как бы пробку на внешней стороне короткозамыкающего кольца. Затем поворачивают ротор на 180° и пропавивают соединения с внутренней стороны, заливая в зазор между стержнями и короткозамыкающим кольцом припой марки ПСр45, температура плавления которого 725°C .

В данном варианте ремонт нижней клетки производился без демонтажа ее стержней и короткозамыкающих колец, которые в двух-

клеточных роторах типа АТМ являются одновременно и нажимными, фиксирующими запрессовку активной стали ротора.

Если при ремонте необходимо снять нижние кольца, то предварительно следует зафиксировать пакет активной стали ротора специально изготовленными для этой цели стальными фланцами с четырьмя стягивающими шпильками, как это схематически показано на рис. 40.

Реконструкция двухклеточных роторов типа АТМ

на одноклеточное исполнение. Из предыдущего примера ремонта ясно, что для ликвидации даже незначительных повреждений нижней клетки необходимо производить демонтаж верхней клетки, что в значительной степени усложняет ремонт ротора и удлиняет сроки ввода двигателя в эксплуатацию. Кроме того, почти невозможно при профилактических осмотрах обмоток обнаружить дефекты нижней клетки и предупредить аварийный выход двигателя из строя.

Часто двигатели типа АТМ работают с механизмами, запускаемыми без нагрузки или с малой нагрузкой. В этих случаях от двигателя не требуется слишком большого пускового момента, которым обладает двухклеточный двигатель. В то же время рабочие нагрузки могут быть значительными, и в практике эксплуатации имеют место неоднократные повреждения рабочей (нижней) клетки. В этих случаях целесообразно реконструировать двигатель, перейдя на одноклеточное ис-

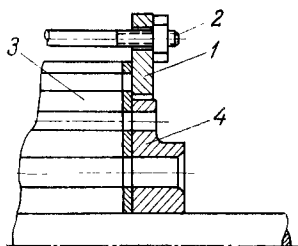


Рис. 40. Установка приспособлений для стяжки пакета активной стали ротора при демонтаже нажимных шайб.

1 — фланец; 2 — стягивающая шпилька; 3 — бочка ротора; 4 — нижнее короткозамыкающее кольцо (нажимная шайба ротора).

полнение. Вариант переделки двигателей типа АТМ-1-го габарита (АТМ-500, АТМ-700, АТМ-850) разработан заводом изготовителем и состоит из следующих операций:

- 1) демонтаж верхней клетки, для чего короткозамыкающие кольца срезают на токарном станке и выбивают стержни;
- 2) распайка и удаление медных стержней нижней клетки;
- 3) проточка нажимных колец до размеров, указанных на рис. 41, а;

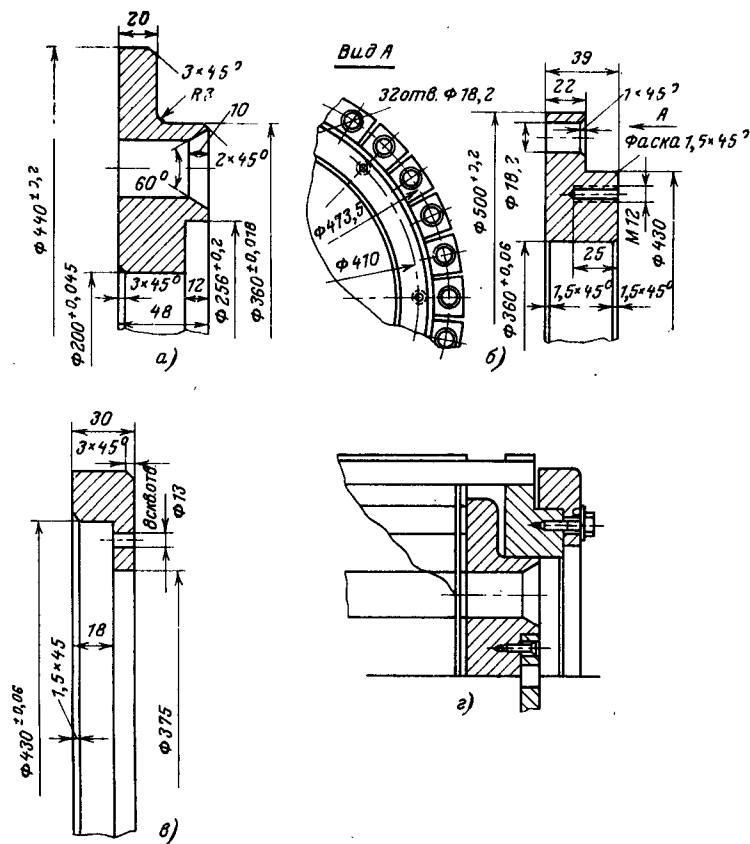


Рис. 41. Реконструкция двухклеточного ротора типа АТМ на одно-клеточный.

4) изготовление новых деталей — два короткозамыкающих медных кольца (рис. 41,б), 32 медных стержня верхней клетки диаметром 18 мм, длиной 625 мм для двигателей типа АТМ-850, 550 мм — для АТМ-700 и 450 мм — для АТМ-500; два стальных (сталь 45) бандажных кольца (рис. 41,в); шестнадцать болтов М12 длиной 30 мм, крепящих бандажные кольца к короткозамыкающим (рис. 41,г);

5) сборка и пайка беличьей клетки (рис. 41,г);

6) проточка бочки ротора до диаметра 494 мм (от 496 мм в двухклеточном исполнении).

Предотвращение поворота короткозамыкающего кольца относительно бочки ротора. Выше приводились

причины повреждений такого рода (см. рис. 26,в). При эксплуатации явление поворота короткозамыкающего кольца относительно бочки ротора имеет место, например, у асинхронных двигателей типа КАМО-350-2. Для предотвращения этого явления у находящихся в эксплуатации двигателей рекомендуется связать каждое короткозамыкающее кольцо с нажимной шайбой с помощью двух диаметрально расположенных шпонок. Шпонки выполняют на специальных пластинах, привариваемых к нажимным плитам ротора. Конструкция узла короткозамыкающих колец асинхронного двигателя типа КАМО350-2 и расположение приваренных шпоночных пластин показаны

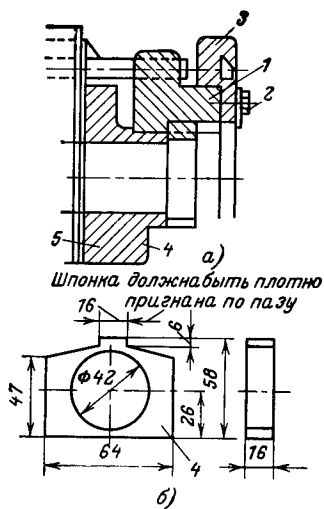


Рис. 42. Установка фиксирующих шпонок в роторе двигателя типа КАМО-350-2.

на рис. 42,а, а на рис. 42,б изображена шпоночная пластина.

Фиксирование короткозамыкающих колец от проворота выполняют в следующей последовательности:

1. В каждом короткозамыкающем кольце 1 выполняют по два диаметрально расположенных шпоночных паза размером 6,5×16 мм. При выполнении пазов бандажные кольца 3 рекомендуется снять, для чего вывин-

чивают предварительно болты 2; следует обратить внимание на строго диаметрально расположенные шпоночные пазы и последующую приварку шпоночных пластин для того, чтобы не нарушать балансировку ротора.

2. Изготавливают четыре шпоночные пластины, размеры каждой шпонки тщательно подгоняют по размерам соответствующего шпоночного паза в короткозамыкающих кольцах.

3. После подгонки шпоночные пластины 4 устанавливают по месту и приваривают к нажимной плите 5 по контуру качественным швом с катетом, равным 5 мм.

Реконструкция беличьей клетки глубокопазных двигателей. Если в эксплуатации наблюдаются частые поломки деталей беличьей клетки глубокопазных двигателей, то следует прибегнуть к радикальному способу переделки короткозамыкающей обмотки — разделению стержней по высоте на две части, т. е. замене одной беличьей клетки двумя клетками с отдельными короткозамыкающими кольцами.

При этом возможны различные варианты исполнения, связанные с условиями работы данного переделываемого двигателя.

Если выполнить обе пары колец из меди без дополнительных стальных прокладок между стержнями, то пусковые и рабочие характеристики двигателя не изменятся. Перепады температуры по высоте паза в пусковом режиме останутся такими же, как при неразделенном стержне, но верхние более горячие стержни смогут свободно расширяться. Вследствие этого механические напряжения в стержнях резко снизятся, что обеспечит нормальную работу двигателя.

Стержни следует заменить двумя стержнями половинной высоты или же стержни наружной клетки можно сделать на 10—20% ниже стержней внутренней клетки. Ширина стержней должна быть равна ширине старого, неразделенного стержня.

Если требуется увеличить пусковой момент переделываемого глубокопазного двигателя, то это можно сделать лишь за счет определенного снижения его полезной мощности в рабочем режиме. Увеличение пускового момента осуществляется за счет введения стальной прокладки между стержнями в пазовой части и выполнения короткозамыкающих колец наружной клетки из стали.

За счет стальной прокладки сечение медных стержней верхней клетки снижается на 12—20%, что и снижает общее сечение стержней короткозамкнутой обмотки при прохождении через них рабочего тока двигателя при нормальной работе. Отсюда соответственно и снижение мощности двигателя.

Конструкция узла короткозамыкающих колец может быть выполнена по одному из видов, показанных на рис. 20.

Указанным способом следует переделывать двигатели, роторные стержни которых имеют высоту не менее 30 мм.

Другое довольно часто встречающееся повреждение «беличьих клеток» глубокопазных роторов электродвигателей типа ГАМО заключается в разрыве стержней около места их соединения с короткозамыкающими кольцами. По данным некоторых авторов [1], по указанной причине роторы электродвигателей типа ГАМО повреждались через 8—10 мес эксплуатации.

Переделка белых клеток этих электродвигателей, при которой срок их службы увеличился в 2—3 раза, заключается в том, что стержни по выходе из пазов сердечника ротора изгибаются по радиусу, образуя своего рода компенсаторы (рис. 43).

Криволинейная форма концов стержней значительно снижает действие сил, стремящихся сместить, стержни по отношению к кольцу и тем самым резко уменьшает возможность их отрыва от кольца.

При переделке клетки между нажимной шайбой и короткозамыкающим кольцом устанавливают фиксирующие винты, предотвращающие возможность проворачивания кольца.

Поворот стального бандажного кольца относительно медного короткозамыкающего кольца. Такой дефект может иметь место в случаях недостаточно плотной посадки бандажного кольца. В последнее время в эксплуатации подобное явление наблюдается у отдельных двигателей типа АТД, у которых бандажное кольцо имеет специальный посадочный буртик (см. рис. 16, деталь 4). Для предотвращения проворота нагревают и снимают стальное бандажное кольцо; на внешнем торце на линии посадки бандажного кольца фрезеруют шесть — восемь симметрично расположенных по окружности полулунок глубиной 2 мм и радиусом около 3 мм, затем насажи-

вают бандажное кольцо и расчеканивают медное короткозамыкающее кольцо в местах расположения полулунок.

Устранение дефектов пусковых клеток синхронных двигателей. В основном дефекты пусковых клеток синхронных двигателей вызываются теми же причинами, какие мы отмечали и у короткозамкнутых обмоток асинхронных двигателей, и, следовательно, способы их устранения аналогичны.

Здесь же мы остановимся на повреждении короткозамкнутой обмотки, характерном только для синхрон-

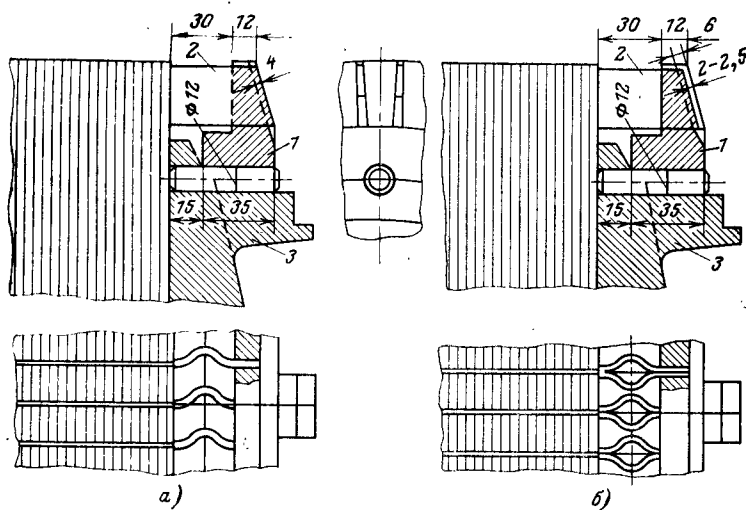


Рис. 43. Усовершенствование конструкции обмотки ротора двигателя серии ГАМО.

а — исполнение с одинарными тонкими стержнями; *б* — исполнение с двойными стержнями толщиной 4 мм и более; 1 — кольцо; 2 — стержень обмотки; 3 — нажимная шайба.

ных двигателей. Речь идет о дефектах, представленных на рис. 26, б и г, являющихся следствием повышенных токовых нагрузок крайних на каждом полюсе стержней. Для предотвращения чрезмерных тепловых удлинений крайних стержней, если в практике эксплуатации имели место обрывы, рекомендуется реконструировать пусковую клетку, применив медные стержни с компенсаторами, конструкция которых показана на рис. 24.

Если стержни пусковой клетки изготовлены из бронзы или латуни, то мерой, значительно снижающей меха-

нические напряжения, является замена крайних стержней на каждом полюсе медными. Так как электрическое сопротивление меди в несколько раз меньше, чем латуни или бронзы, то нагрев и, следовательно, абсолютное удлинение медных стержней будут меньше.

При 10 стержнях и более на полюс можно рекомендовать замену медными по два крайних стержня. Незначительное снижение пускового момента вследствие уменьшения активного сопротивления короткозамкнутой обмотки при замене части латунных стержней медными для большинства двигателей не имеет практического значения.

В данной книге мы рассмотрели только общие наиболее характерные повреждения беличьих клеток и их способы устранения, а также применяемые виды ремонтов для некоторых конкретных типов двигателей.

В эксплуатации короткозамкнутых обмоток синхронных и асинхронных машин различных типов и конструкций, кроме наиболее характерных, могут встретиться отдельные дефекты и повреждения, присущие только данному конкретному двигателю. Задачей эксплуатационного персонала является своевременная профилактика и обнаружение такого рода дефектов, а главное — необходимо установить вызывающие их причины. Только тогда можно грамотно произвести ремонт двигателя и предотвратить при дальнейшей эксплуатации аварийный выход его из строя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баннов С. Е. Ремонт электрооборудования металлургических заводов. М., Металлургиздат, 1957. 504 с.

2. Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А., Сергеев П. С. Проектирование электрических машин. М., «Энергия», 1969. 632 с.

3. Виноградов Н. В. Производство электрических машин. М., «Энергия», 1970. 888 с.

4. Иванов Е. А. Электрические машины переменного тока. Вып. II. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором специального исполнения. М., Госэнергоиздат, 1961. 264 с.

5. Маршак Е. Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1970. 280 с.

6. Оркина Б. Г. Переделка фазных двигателей в короткозамкнутые. М., Госэнергоиздат, 1949. 56 с.

7. Пиотровский Л. М. Электрические машины. М., «Энергия», 1974. 504 с.

8. Рубо Л. Г. Пересчет и ремонт асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт. М., Госэнергоиздат, 1961. 392 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Основные электрические параметры и геометрические размеры короткозамкнутых обмоток	5
2. Классификация и конструктивные формы короткоза- мкнутых обмоток роторов	10
3. Повреждения короткозамкнутых обмоток в процессе эксплуатации	40
4. Ремонт беличьих клеток	56
Список литературы	77

РУДОЛЬФ БОРИСОВИЧ УМАНЦЕВ .

Конструкции и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов
крупных двигателей

Редактор издательства *И. П. Березина*

Обложка художника *В. И. Карпова*

Технический редактор *М. Г. Вишневская*

Корректор *Г. Г. Желтова*

Сдано в набор 19/V 1976 г.

Подписано к печати 14/IX 1976 г.

T-15137

Формат 84×108^{1/32}

Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 4,2

Уч.-изд. л. 4,19

Тираж 20 000 экз.

Зак. 670

Цена 16 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Готовятся к печати в 1977 г.

в серии «Библиотека электромонтера»

В. Н. Вавин. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. 5,5 л.

Л. И. Вайнштейн. Меры безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. 8,5 л.

О. С. Голоднова. Эксплуатация схем масло-снабжения и уплотнений турбогенераторов с водородным охлаждением. 5 л.

М. Л. Голубев. Вторичные цепи на подстанциях с переменным оперативным током. 5 л.

А. А. Ермилов. Электроснабжение промышленных предприятий. Изд. 3-е, перераб. и доп. 6 л.

Е. А. Каминский. Звезда, треугольник, зигзаг. Изд. 4-е. 6 л.

М. Л. Каминский. Проверка и испытания электрических машин. 5 л.

И. В. Коваленский. Релейная защита электродвигателей. Изд. 2-е, перераб. и доп. 5 л.

В. А. Кожемякин, В. Г. Получанкин. Особенности монтажа высокочастотных генераторов. 4 л.

В. Н. Кондратюк, С. Р. Резинский, И. Х. Евзеров. Тиристорные преобразователи серии ТП/ТВ. 5 л.

Ф. Д. Кузнецов. Высокочастотная часть диффазных защит. Изд. 2-е, перераб. и доп. 5 л.

Я. И. Лейбзон. Монтаж и эксплуатация контактных и бесконтактных муфт скольжения. 5,5 л.

О. П. Лабок, Г. Г. Семенов. Управление, сигнализация и блокировка разъединителей. 5 л.

Л. Б. Масандилов, В. В. Москаленко. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Изд. 2-е, перераб. и доп. 5 л.

М. Б. Миндин, И. Б. Непомнящий. Монтаж приборов измерения расхода жидкости и газа. 5 л.

М. А. Потапов. Монтаж гибких шин распределительных устройств. 5 л.

Г. Я. Рыжавский. Присоединение высокочастотных каналов к линиям электропередачи. 4 л.

Л. Ц. Шкап, В. А. Заботин. Театральные регуляторы света. 5 л.

Цена 16 коп.