

## АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ П

М. Н. УЛЯНИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Широкое развитие автоматики требует значительного увеличения масштабов производства двигателей и генераторов постоянного тока малой мощности. В связи с этим имеется необходимость в создании новых, еще более экономичных и надежных маломощных машин постоянного тока. Одним из основных направлений в решении поставленной задачи является исследование распределения температуры в существующих машинах с целью получения наиболее полного представления о термической нагрузке изоляции обмоток и выяснения возможностей улучшения охлаждения. В данной работе представлены результаты исследования температурных полей в двигателях постоянного тока единой серии П типа ПБ, ПО и П.

### 1. Методика эксперимента

Исследование температурных полей двигателей проводилось с помощью медно-константановых термопар, изготовленных из изолированных проводов диаметром 0,2 мм. Для получения достаточно полной и достоверной картины распределения температуры в каждый из двигателей было заложено от 100 до 150 термопар. Термопары размещались в якоре, полюсных катушках, полюсных сердечниках, внутреннем воздухе, станине и подшипниковых щитах.

В якорь и полюсные катушки термопары закладывались в процессе производства машины. При этом не было сделано никаких отклонений от установленной технологии изготовления обмоток. Для размещения термопар в полюсных сердечниках, станине, подшипниковых щитах и коллекторе высверливались отверстия диаметром 1,5 мм.

После закладки термопар отверстия зашпаклевывались алюминиевой фольгой. С целью уменьшения погрешности, обусловленной оттоком тепла по термопаре, отвод термоэлектродов от места измерения на протяжении первых 1 ÷ 2 см по возможности выполнялся вдоль изотермической поверхности. Во всех случаях расположение термопар практически исключало возможность нарушения нормального цикла вентиляции. Для повышения точности при измерениях температуры на неподвижных частях машины было использовано дифференциальное включение контрольной термопары (рис. 1). Термопары, расположенные в якоре, были выведены к приставному токосъемнику с медными

кольцами и меднографитными щетками. Свободные концы термопар припаивались к медным клеммам круглого текстолитового диска, вращавшегося в кольцевом пространстве, изолированном от внешней среды специальным кожухом. Равномерное размещение клемм по окруж-

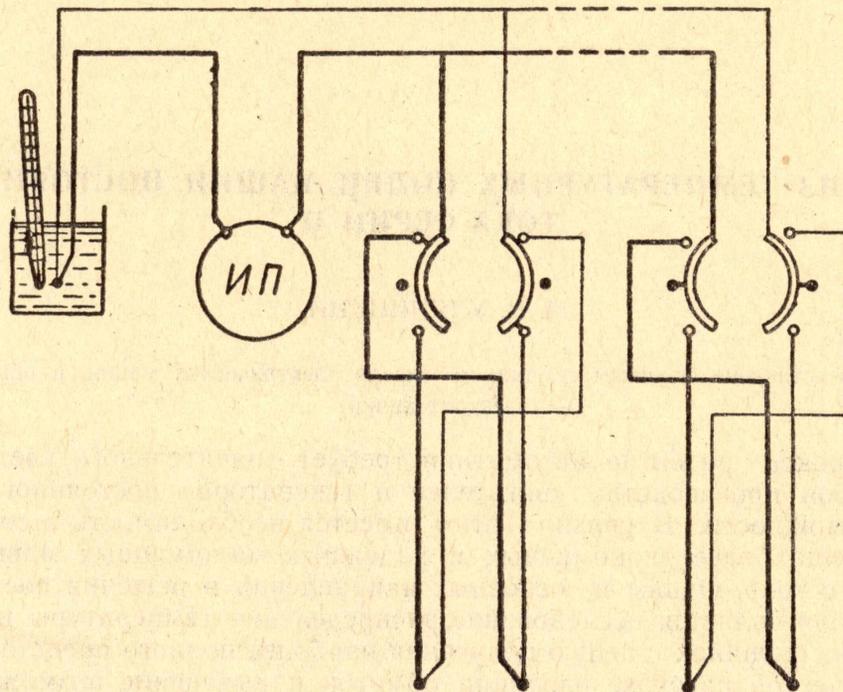


Рис. 1. Схема измерения температуры на неподвижных частях машины.

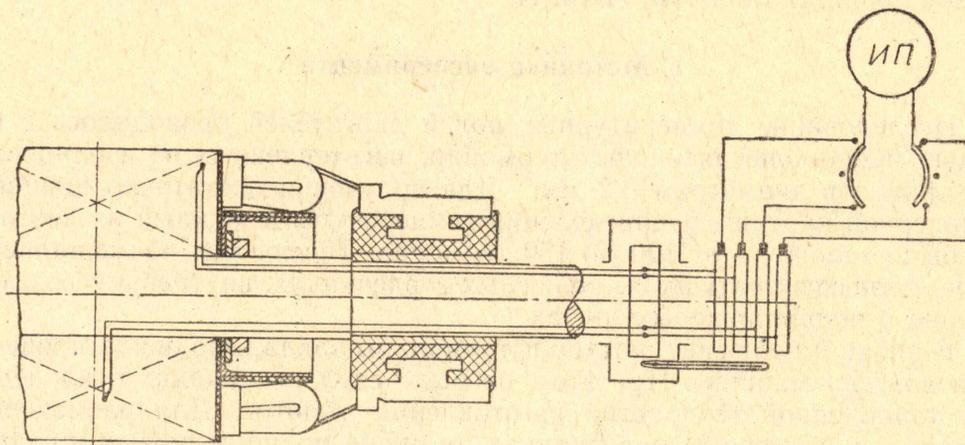


Рис. 2. Схема измерения температуры на вращающихся частях машины.

ности диска обеспечило практически одинаковые тепловые условия для всех свободных спаев вращающихся термопар. Температура воздуха в кольцевом зазоре определялась термометром. Схема подключения вращающихся термопар приведена на рис. 2. Предварительные испытания токосъемника показали, что величина контактных термо-э. д. с. не превышает  $3,5 \cdot 10^{-2}$  мв или в пересчете на температуру при термопаре из меди—константана  $\approx 0,8^\circ\text{C}$ . Для исключения погрешности, вносимой переходными сопротивлениями токосъемника, термо-э. д. с. измеря-

лись по компенсационной схеме потенциометром типа ППТВ1 и гальванометром с ценой деления  $2,2 \cdot 10^{-3}$  мка. Средние перегревы обмоток определялись по методу сопротивления с помощью амперметров и вольтметров класса точности 0,5. Для сокращения времени от момента отключения двигателя до снятия первого отсчета при измерении горячего сопротивления якоря были выведены отпайки от коллекторных пластин и использованы специальные устройства для быстрого поднятия щеток.

Температура окружающей среды в опытах измерялась тремя термометрами, расположенными вокруг работавшей машины на расстоянии  $1,5 \div 2$  м.

## 2. Исследование температурных полей в закрытых двигателях типа ПБ<sup>1)</sup>

Исследование распределения температуры в полюсных обмотках двигателей ПБ52 (рис. 3,а), ПБ42, имеющих полюсные катушки с отношением сторон  $\frac{h}{b} > 1$ , показало, что разность между значениями перегревов по ширине и высоте поперечных сечений катушек главных и добавочных полюсов не превышает соответственно  $4 \div 6\%$  и  $4 \div 10\%$  от величины перегрева в центре поперечного сечения. В двигателях ПБ12, ПБ32 (рис. 4,а), имеющих полюсные катушки с отношением сторон  $\frac{h}{b} < 1$ , разность между аналогичными перегревами в главных и добавочных полюсах достигает соответственно  $5 \div 10\%$  и  $5 \div 15\%$ .

Из полученных в опытах значений перегревов на противоположных сторонах катушек следует, что в полюсных обмотках двигателей ПБ42, ПБ52 точка с максимальной температурой смещена от центра поперечного сечения катушек к внешней боковой поверхности. Это объясняется тем, что в сравнительно узком междукатушечном пространстве четырехполюсных двигателей средние перегревы воздуха превышают перегревы полюсных сердечников и незначительно (в среднем на  $5 \div 10\%$ ) отличаются от перегревов на внешней поверхности полюсных обмоток. Двухполюсные двигатели ПБ12, ПБ32 имеют сравнительно большие размеры междукатушечного пространства и наружной поверхности полюсных обмоток. Средние перегревы внутреннего воздуха и наружной поверхности полюсных катушек в этих двигателях отличаются на  $17-20\%$ . Вследствие этого конвективный теплообмен полюсных обмоток в двигателях ПБ12, ПБ32 происходит более интенсивно, чем в четырехполюсных двигателях. Опыты показывают, что в полюсных обмотках двухполюсных двигателей точка с максимальной температурой смещена к внутренней боковой поверхности катушек.

Следует заметить, что распределение температуры в полюсных катушках будет зависеть от соотношения между значениями средних перегревов обмоток машины или, другими словами, от величины удельных потерь. Например, с увеличением потерь в обмотках якоря и добавочных полюсов будет уменьшаться теплоотдача с внешней поверхности охлаждения обмотки параллельного возбуждения, что, в свою очередь, вызовет перераспределение температуры в поперечном сечении катушек главных полюсов.

<sup>1)</sup> Двигатели типа ПБ выпускаются заводом «Электромашина» без внутренних вентиляторов.

Согласно данным, полученным при исследовании распределения температуры в полюсных обмотках в аксиальном направлении, изменение температуры по длине полюсных катушек не превышает 1°C. Такое равномерное распределение температуры можно объяснить высокой теплопроводностью меди и примерно одинаковыми условиями охлаждения по длине полюсных катушек в машинах типа ПБ. Следует отметить неравномерное распределение температуры в полюсных

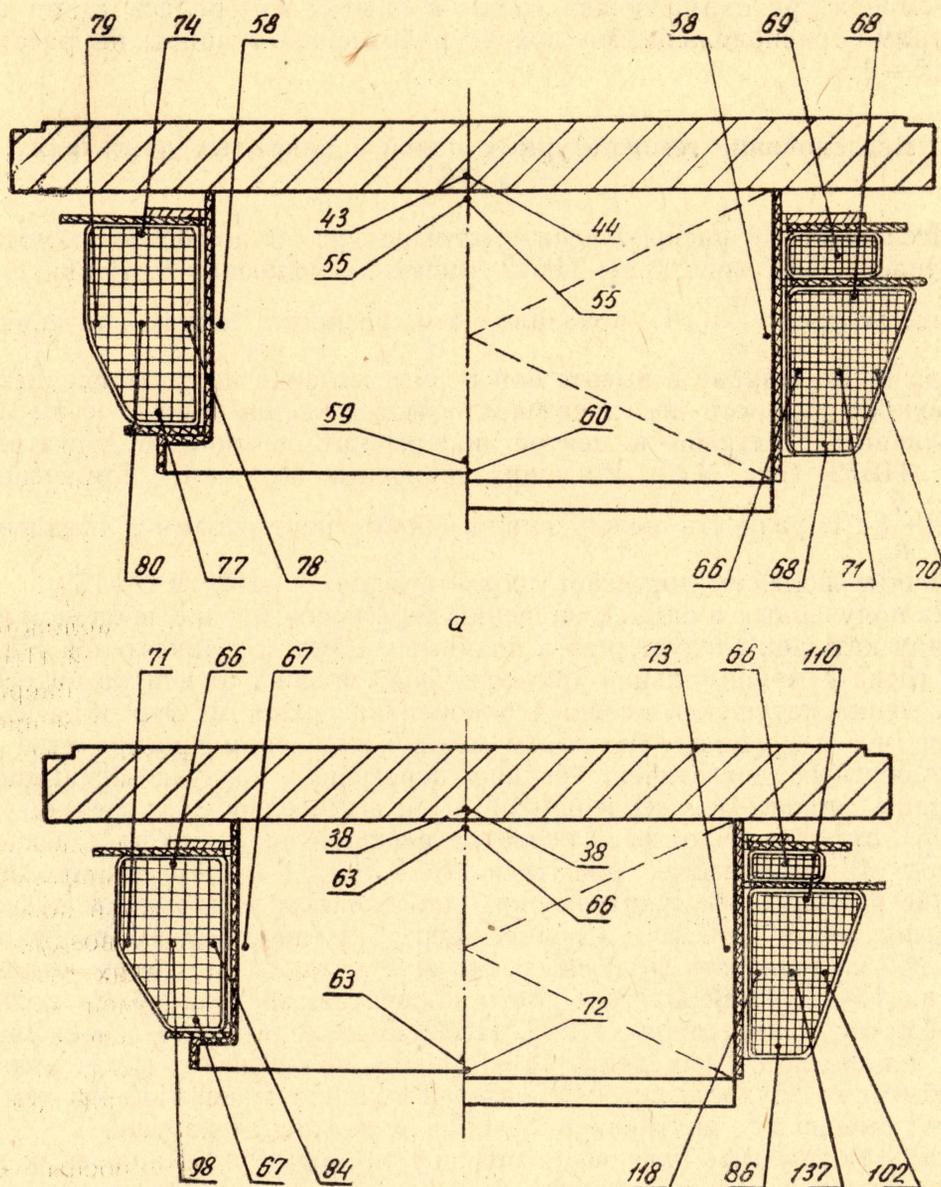


Рис. 3. Распределение температуры в полюсных катушках с отношением сторон  $\frac{h}{b} > 1$ : а — двигатель ПБ52; б — двигатель П42.

обмотках по окружности станины. Перегревы полюсных катушек, расположенных выше горизонтальной оси вала, на 4÷5% больше, чем в диаметрально противоположных. Аналогичное явление наблюдается и в отношении перегревов внутреннего воздуха и полюсных сердечников.

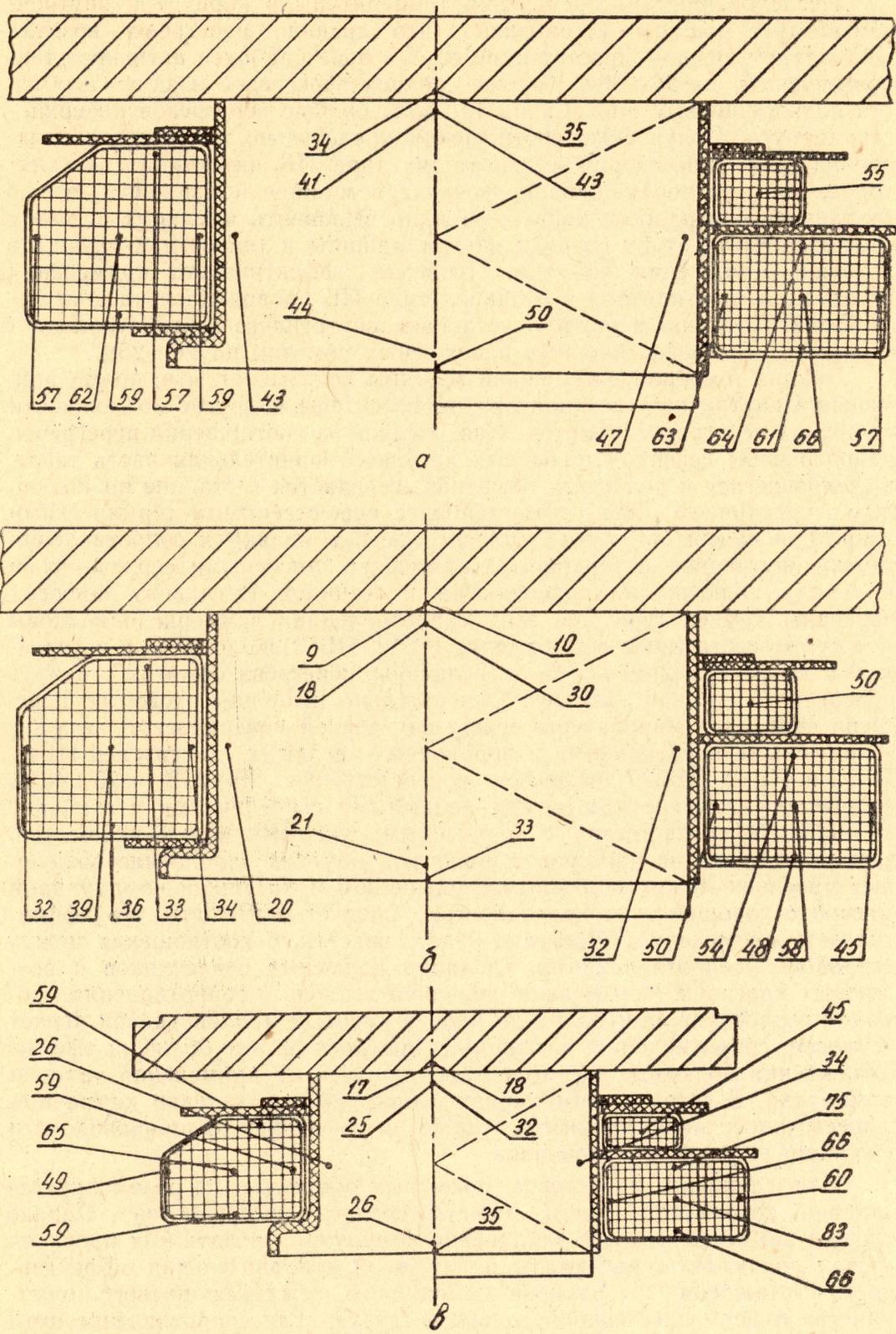


Рис. 4. Распределение температуры в полюсных катушках с отношением сторон  $\frac{h}{b} < 1$ : а — двигатель ПБ32; б — двигатель ПО32; в — двигатель П12

Исследованием распределения температуры в корпусе и внутреннем воздухе машины установлено, что средние перегревы воздуха в междукатушечном пространстве, т. е. в зоне наиболее активного тепловыделения, на 20÷30% больше средних перегревов воздуха в области подшипниковых щитов и на 40÷45% больше перегревов поверхности корпуса. Полученные соотношения убедительно показывают целесообразность применения в двигателях типа ПБ внутренних вентиляторов, так как перемешивание воздуха в машине и движение его по внутренней поверхности корпуса должно выровнять и снизить в целом среднюю температуру воздуха внутри машины и тем самым улучшить условия охлаждения обмоток. Проверка эффективности применения внутреннего вентилятора в машинах типа ПБ проводилась на двигателе ПБ42. По данным опытов, установка внутреннего вентилятора дает снижение перегревов якорных и полюсных обмоток на 20—25%.

Анализ температурных полей машины показывает, что, кроме применения внутреннего вентилятора, имеются еще и другие возможности снижения перегревов обмоток. Как следует из соотношения перегревов в поперечных сечениях полюсных катушек, значительная часть тепла, выделяющегося в полюсных обмотках, передается к станине по полюсным сердечникам. При этом наиболее существенными термическими сопротивлениями на пути теплового потока являются сопротивления между внутренней поверхностью катушек и полюсными сердечниками и между полюсными сердечниками и станиной. В главных полюсах перепады температуры на этих сопротивлениях примерно одинаковы и в сумме составляют в двигателях ПБ42, ПБ52 около 30%, а в двигателях ПБ12, ПБ32 40÷50% от величины перегрева обмоток в центре поперечного сечения катушек. Относительно величины этого же перегрева перепады температуры между внутренней поверхностью катушек и полюсными сердечниками в добавочных полюсах двигателей ПБ42, ПБ52 и ПБ12, ПБ32 достигают соответственно 20—25% и 25÷40%, а перепады температуры между полюсными сердечниками и станиной 15÷20%. В соответствии с полученными данными можно рекомендовать для снижения перегревов полюсных обмоток заполнение воздушных прослоек между полюсным сердечником и катушкой компаундной массой с хорошей теплопроводностью. Следует учитывать, что эффективность применения компаунда будет зависеть от соотношения между тепловыми сопротивлениями изоляции полюсных сердечников и воздушных прослоек. Чем меньше величина теплового сопротивления изоляции сердечника, тем большую роль в процессе теплопередачи играет тепловое сопротивление воздушных прослоек и тем больший эффект охлаждения полюсных обмоток будет получен от применения заливки компаунда. В связи с этим наряду с применением заливки компаунда существенное значение имеет также и улучшение теплопроводности изоляции полюсных сердечников.

Для снижения перегревов полюсных обмоток в [1] рекомендуется заливка компаундом всего междуполюсного пространства. Однако следует заметить, что при заполнении компаундом воздушных прослоек между полюсным сердечником и катушкой дополнительная эффективность охлаждения от заливки компаундом междукатушечного пространства будет существенной только в случае, если сопротивление пути теплового потока катушки к станине по компаунду в междукатушечном пространстве будет одного порядка с величиной сопротивления пути теплового потока катушки к станине по полюсному сердечнику. Если последнее сопротивление сравнительно невелико или практически отсутствует (низковольтные машины с цельноштампованным ин-

дуктором), то дополнительная заливка компаундом междукатушечного пространства не приведет к существенному эффекту, так как в этом случае сопротивление пути теплового потока катушки к станине по полюсному сердечнику будет значительно меньше теплового сопротивления пути по компаунду в междукатушечном пространстве.

Снижение перегревов полюсных обмоток может быть получено при уменьшении теплового сопротивления между полюсным сердечником и станиной. Уменьшение этого сопротивления, например, с помощью механической обработки, даст возможность снизить перегревы не только полюсных обмоток, но и обмотки якоря.

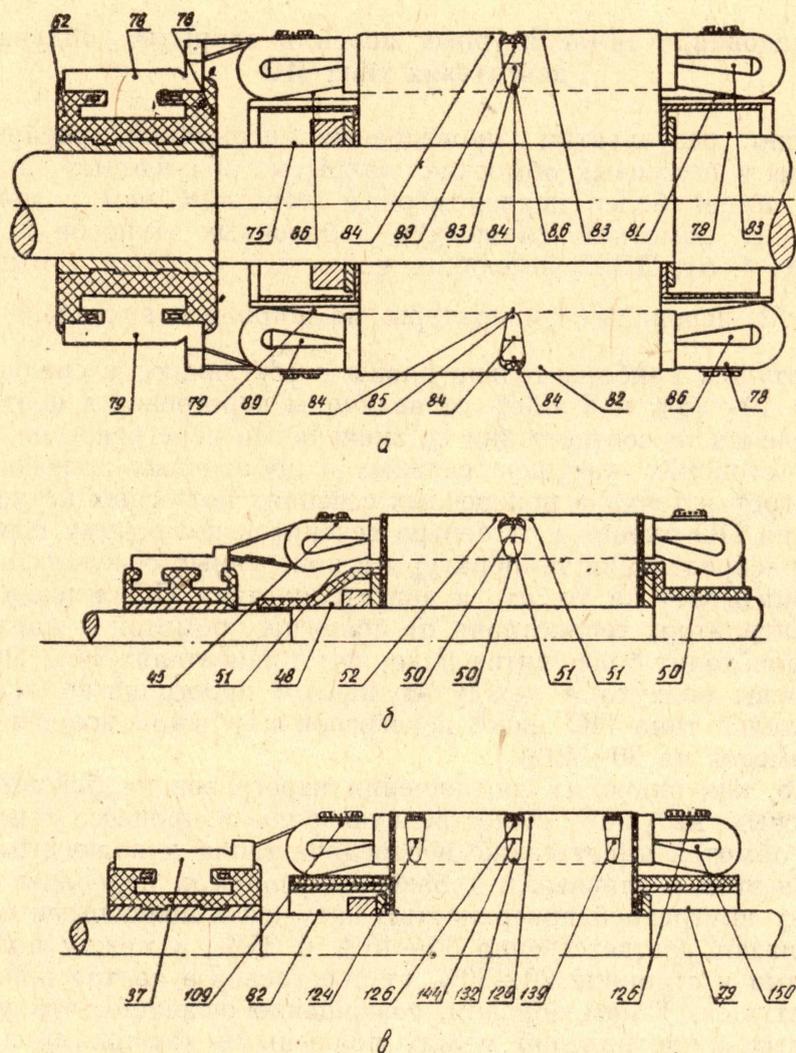


Рис. 5. Распределение температуры в якорях двигателей серии П: а — двигатель ПБ32; б — двигатель ПО32; в — двигатель П42.

По данным, полученным при исследовании температурных полей в якорях двигателей ПБ52 (рис. 5, а), ПБ32, значения перегревов в различных точках якорных обмоток отличаются не более, чем на 10÷15%. Разность между значениями перегревов по высоте паза не превышает 5%, а по высоте лобовых частей 5÷10%. Перегревы зубцов и меди в пазовой части обмотки отличаются на 2÷3%. Незначительную величину имеют также перепады температуры по высоте зубцов (1÷3°C)

и по изоляции пазов якоря ( $1,5 \div 2^\circ\text{C}$ ). Значения перегревов в диаметрально противоположных точках обмотки и железа якоря отличаются на  $2 \div 3^\circ\text{C}$ . Перегревы меди коллектора у всех двигателей оказались на  $10 \div 12\%$  ниже средних перегревов прилегающих лобовых частей. Кроме того, установлено, что перегревы вала внутри машины имеют сравнительно меньшие значения относительно перегревов основания зубцов. Таким образом, полученное распределение значений перегревов по железу якоря в радиальном направлении дает основание считать, что часть потерь, выделяющихся в якоре, отводится в окружающую среду через вал.

### 3. Исследование температурных полей в закрытых обдуваемых двигателях типа ПО

Согласно результатам проведенных испытаний, распределение температуры в полюсных обмотках закрытых обдуваемых двигателей типа ПО имеет более неравномерный характер, чем в двигателях типа ПБ. В обмотках главных и добавочных полюсов двигателей ПО32 (рис. 4, б), ПО22, имеющих полюсные катушки с отношением сторон  $\frac{h}{b} < 1$ , перепады температуры по ширине и высоте поперечных

сечений катушек приблизительно равны и составляют в среднем соответственно  $10 \div 25\%$  и  $8 \div 20\%$  от величины перегревов в центре поперечного сечения. В соответствии со значениями перегревов на противоположных сторонах катушек главных и добавочных полюсов максимально нагретая точка в поперечных сечениях полюсных катушек двигателей типа ПО смещена от центра сечения к полюсному сердечнику. Характер распределения температуры в поперечных сечениях полюсных катушек указывает на то, что в двигателях типа ПО, имеющих внутренний вентилятор, теплоотдача от полюсных обмоток к внутреннему воздуху происходит более интенсивно, чем в двигателях типа ПБ. Средние перегревы воздуха в междукатушечном пространстве двухполюсных двигателей типа ПО ниже перегревов наружной поверхности полюсных обмоток на  $30 \div 40\%$ .

Однако, как видно из соотношения перегревов на боковых сторонах полюсных катушек, существенную роль в процессе теплоотдачи полюсных обмоток имеет также и передача тепла к полюсным сердечникам. При этом в главных и добавочных полюсах перепады температуры между внутренней поверхностью катушек и полюсными сердечниками достигают соответственно  $30 \div 45\%$  и  $35\%$ , а между полюсными сердечниками и станиной  $20 \div 30\%$  от перегревов в центре поперечного сечения катушек. Таким образом, совершенно очевидно, что уменьшение тепловых сопротивлений между полюсными катушками и сердечниками и между полюсными сердечниками и станиной позволит получить существенное снижение перегревов обмоток. Для уменьшения указанных тепловых сопротивлений могут быть использованы методы, предложенные выше для снижения перегревов полюсных обмоток в двигателях типа ПБ. При проверке этих методов на двигателе ПО22 было получено снижение перегревов полюсных обмоток на  $12\%$ .

На рис. 5, б представлены результаты исследования распределения температуры в якоре двигателя ПО32. Как видно из приведенных данных, температурное поле обмотки якоря имеет сравнительно равномерный характер. Температура зубцов якоря практически равна температуре меди в пазовой части обмотки. Температура вала несколько ниже

температуры железа якоря. Таким образом, часть тепла, выделяющегося в якоре, так же, как и в двигателях типа ПБ, отводится через вал.

#### 4. Исследование температурных полей в двигателях защищенного исполнения типа П

Исследованием температурных полей в полюсных обмотках двигателей П12 (рис. 4, в), П22, имеющих полюсные катушки с отношением сторон  $\frac{h}{b} < 1$ , установлено, что соотношения между перегревами на поверхности и в центре поперечных сечений катушек имеют примерно такие же значения, как и в полюсных катушках подобной формы двигателей типа ПО. Согласно полученным данным, перепады температуры по ширине и высоте поперечных сечений полюсных катушек достигают соответственно 25 ÷ 30 и 20% от величины перегрева в центре поперечного сечения. В полюсных катушках с отношением сторон  $\frac{h}{b} > 1$  (рис. 4, в) аналогичные перегревы отличаются на 20 ÷ 25% и 25 ÷ 35%. В соответствии со значениями перегревов на поверхности полюсных обмоток максимально нагретая точка в поперечном сечении полюсных катушек двигателей типа П вне зависимости от соотношения сторон катушки расположена выше горизонтальной оси поперечного сечения и смещена от центра сечения к полюсному сердечнику.

Перепад температуры между полюсным сердечником и внутренней поверхностью полюсных катушек с отношением сторон  $\frac{h}{b} < 1$  и  $\frac{h}{b} > 1$  достигает соответственно 40 ÷ 50% и 20 ÷ 30%, а между полюсными сердечниками и станиной 10 ÷ 15% и 20 ÷ 25% от величины перегревов в центре поперечного сечения катушек.

Весьма неравномерный характер имеет распределение температуры в якорных обмотках двигателей П (рис. 5, в). По данным опытов, значения перегревов в отдельных точках обмоток отличаются более, чем на 30 ÷ 40%. Наибольшую величину достигают перепады по высоте лобовых частей (30 ÷ 40%). Значения перегревов по высоте пазов и в аксиальном направлении обмоток отличаются на 10 ÷ 15%. Максимальную температуру в радиальном направлении показали термопары, расположенные между слоями обмоток. У всех исследованных двигателей перегревы меди коллектора на 40 ÷ 50% ниже средних перегревов прилегающих лобовых частей, а перегревы вала примерно на 25 ÷ 30% ниже перегревов в зубцовой зоне якоря.

#### Выводы

1. Сравнительный анализ температурных полей исследованных двигателей показывает, что наиболее равномерный характер распределения температуры, а следовательно, и наиболее равномерную термическую нагрузку изоляции обмоток имеют двигатели типа ПБ. По данным опытов, значения перегревов в различных точках обмоток этих двигателей отличаются от средних перегревов обмоток, полученных по методу сопротивления, не больше, чем на 5 ÷ 10%. Наиболее неравномерную термическую нагрузку изоляции имеют обмотки двигателей типа П. Значения перегревов в отдельных точках обмоток двигателей защищенного исполнения могут превышать значения средних перегревов обмоток на 15 ÷ 20%.

2. Анализ температурных полей указывает на возможность снижения перегревов полюсных обмоток двигателей при уменьшении теплового сопротивления между полюсными сердечниками и станиной и заполнении компаундом воздушных зазоров между полюсными сердечниками и катушками. Следует отметить, что применение указанных методов в двигателях типа ПО и П, а также в двигателях типа ПБ, имеющих полюсные катушки с отношением сторон  $\frac{h}{b} < 1$ , даст возможность одновременно с понижением средних перегревов обмоток уменьшить разность между значениями перегревов в поперечных сечениях катушек, т. е. получить более равномерное распределение температуры в полюсных обмотках.

3. Полученные опытные данные могут быть использованы для разработки методики тепловых расчетов и сравнительной оценки надежности исследованных типов двигателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О. П. Сидоров. Охлаждение закрытых машин постоянного тока. Электричество, № 9, 1962.
2. Г. П. Зедгинидзе. Измерение температуры вращающихся деталей машин. Машгиз, 1962.
3. Г. К. Жерве. Промышленные испытания электрических машин. Госэнергоиздат, 1959.