

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

С.О. Хомутов, В.А. Рыбаков

*Статья посвящена проблеме снижения остаточного послеремонтного ресурса электродвигателей в результате повреждения в них стали статора и повышения их рабочей температуры. Предложена схема для опытного выявления величины тепловых потерь. Проведен анализ тепловых потерь после различных видов деструкции обмотки и показан пример их расчета. Определено снижение срока службы электродвигателей.*

Актуальным для любого предприятия является безотказная работа установленных электродвигателей и, соответственно, бесперебойность технологического процесса. Для решения данной задачи необходимо их качественное техническое обслуживание в процессе эксплуатации и проведение ремонтных работ высококвалифицированным персоналом с учетом всех требований существующих технологий ремонта.

Проблема качественного ремонта и эксплуатации становится ясной, если учесть, что в силу ряда достоинств (относительная дешевизна, высокие энергетические показатели, простота обслуживания) асинхронные двигатели являются наиболее распространенными в промышленности среди всех электрических машин. В количественном отношении они составляют около 90 % всего парка машин, а по установленной мощности – около 55 % [1]. Асинхронные двигатели выпускают, как правило, большими сериями, наиболее значительными из которых являются машины общего назначения – серии 4А, АИ и серии специализированных двигателей, например крановых МТ, взрывозащищенных ВР и др. Двигатели малой мощности для бытовой техники выпускают в количестве нескольких десятков миллионов штук в год [2].

Вследствие эксплуатации двигатели периодически выходят из строя. Если вовремя не вывести их в ремонт, то это может привести к авариям на производстве и массовому недовыпуску продукции, а, следовательно, и к финансовым затратам. Основную часть электрических машин ремонтируют сами потребители, причем ремонт ведется по упрощенной технологии с низкой производительностью труда и высокой себестоимостью. После проведения ремонтных работ срок службы двигателя меньше времени, которое он выработал до выхода из строя, за счет появления деформаций в сердечнике статора, вызванных тем или иным видом деструкции.

Очевидно, что уменьшение срока службы имеет прямую зависимость от вида деструкции, но на сегодняшний день данная зависимость не выявлена.

Наиболее часто применяемыми на предприятиях методами деструкции являются: механический, термический, термоокислительный, химический метод и гидролитическая деструкция связующего (ГДС).

Термоокислительная деструкция производится с помощью различных способов, таких как обжиг в печах, обжиг с использованием высокочастотного и индукционного нагрева и разложение изоляции в расплавах солей. Однако протекание процесса деструкции при температуре 290-320<sup>0</sup>С сопровождается выделением токсичных веществ. Высокая температура в сочетании с агрессивными продуктами деструкции вызывают значительную коррозию металла, изменение конструкции и другие дефекты, что, в свою очередь, ведет к снижению КПД двигателя. Такой метод нецелесообразен [3, 4].

Химическая деструкция – это совокупность химических процессов, приводящих под действием агрессивных сред к изменению химической структуры полимера, его молекулярной массы. Применение растворов сильных минеральных кислот нежелательно, а часто и не возможно из-за того, что сталь сильно корродирует. Другие же составы в большинстве своем являются токсичными и их использование вызывает затраты на установку вентиляционных устройств и сложности с захоронением отходов [3, 5].

Наиболее целесообразным является метод гидролитической деструкции связующего, который заключается в обработке изоляции водными перегретыми растворами. Процесс ГДС разработан для удаления вышедшей из строя обмотки без нарушения изоляции между пластинами активного железа. Этот эффект достигается за счет жесткого контроля температуры процесса в специаль-

ной среде, включающей углекислый газ. Процесс осуществляется в автоклавах. Внутри автоклава помещается узел электродвигателя, обмотку которого необходимо удалить. Автоклав представляет собой емкость, герметично закрытую крышкой, внутрь которой подается жидкость определенного состава при заданной температуре и давлении.

После процесса гидролитической деструкции связующего изоляционных материалов обмоток электрических двигателей происходит явное улучшение свойств и характеристик активной стали. Так, удельные потери в стали снижаются, в среднем, на 2,54 %, и происходит общее уменьшение температуры активной стали, в среднем, на 3,2<sup>0</sup>С [6].

Благоприятное действие ГДС на межлистовую изоляцию можно объяснить образованием поверхностных окислов на листах активной стали, а также проникновением продуктов гидролиза изоляции вглубь сердечников, т.е. происходит «залечивание» дефектных мест.

Механическая деструкция – наиболее распространенный метод удаления сыпных обмоток электрических машин. Он заключается в разрезке лобовых частей с одной стороны статора и удалении разрезанных катушек с помощью специального вытяжного приспособления без нагревания или с незначительным нагреванием связующего, что влечет за собой огромные дефекты сердечника. Остатки пазовой изоляции могут быть удалены продувкой сжатым воздухом или различными химическими веществами [7].

Очевидно, что эффективность метода деструкции растет пропорционально его стоимости. Поэтому не всегда возможно использование деструкции, оставляющей наименьшие повреждения сердечника статора электродвигателя.

Тот или иной метод деструкции, в конечном счете, сводится к механическому извлечению обмоток из пазов сердечника статора, но оставляемые повреждения статора после этого будут разными.

К основным дефектам сердечника статора относятся [8]:

- ослабление прессовки;
- распушение крайних пакетов;
- повреждения межлистовой изоляции.

В спрессованном состоянии сердечник статора удерживается нажимными шайбами. Активная сталь должна быть спрессована так плотно, чтобы сила трения между отдельными местами исключала возможность какого-либо перемещения. Однако в процессе из-

влечения обмотки под действием больших вытягивающих сил происходит деформация поперечных шпонок, которыми осуществляется крепление нажимных шайб. Ослабление прессовки листов магнитопровода вызывает шум и повышенную вибрацию, которая при переходных процессах увеличивает свою амплитуду в десятки раз вследствие квадратичной зависимости электродинамических сил от тока, что оказывает существенное влияние на процесс разрушения изоляции в местах выхода обмотки из паза, при перекрещивании проводов и в лобовой части электрических машин. Так же ослабление прессовки оказывает значительное влияние на магнитные свойства: увеличивают коэрцитивную силу, потери на гистерезис и техническую магнитострикцию, уменьшают проницаемость [9-11].

Распушение крайних пакетов происходит из-за того, что лак и обрезанные концы обмотки во время выдергивания последней цепляются и тянут за собой наиболее уязвимые листы стали, а именно те, которые расположены на краях зубцов. Листы расходятся, образуя веер, который тем больше, чем жестче конструкция образованная нажимными шайбами и крайними листами сердечника. Распушение крайних пакетов приводит к непосредственному излому листов.

Повреждения межлистовой изоляции – один из опасных факторов, влияющих на дальнейшую эксплуатацию двигателя.

Нарушение межлистовой изоляции магнитопровода статора машин переменного тока приводит к недопустимому повышению температуры магнитопровода в целом и его отдельных участков. Причиной этого является металлическое соединение между отдельными листами, вследствие чего образуются замкнутые контуры, в которых появляются вихревые токи. Действие последних приводит к повышенному нагреву обмоток и может вызвать ускоренное старение изоляции, потерю ее эластических и механических свойств, неспособность противостоять механическим воздействиям, появление и развитие трещин, выгорание части магнитопровода, а также вызывает неравномерное расширение статора, и, как следствие, динамические изменения воздушного зазора при изменениях режима работы и биение вала [8].

Остаточные повреждения после извлечения обмоток из пазов сердечника статора во многом зависят от прочности связующего. Вид деструкции и качество ее выполнения определяют величину этой прочности, но в то же время возможна негативная реакция дру-

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

гих факторов деструкции, вызывающих повреждение. Данные повреждения обуславливают значительные магнитные и электрические потери в сердечнике статора асинхронного двигателя и, как следствие, уменьшение его межремонтного ресурса.

Изменение магнитных свойств электротехнических сталей начинается еще до эксплуатации при изготовлении статоров электрических двигателей.

Материалы, применяемые в электромашиностроительной промышленности, в значительной степени определяют технические показатели электрических машин. Использование высококачественной стали позволяет существенно уменьшить вес и габариты машин и увеличить их КПД. Свойства изолирующих материалов и лаков ограничивают допустимые электромагнитные нагрузки. Толщина и нагревостойкость изоляционных материалов определяют степень использования электрических машин. Обычно изоляция занимает, в среднем, 30 % общего объема паза, в котором заложены проводники обмотки. Уменьшение толщины изоляции позволяет увеличить объем проводников в пазу, а, следовательно, увеличить мощность машины при сохранении ее габаритов. Повышенная нагревостойкость изоляционных материалов также позволяет увеличить нагрузку машины [9].

Технические показатели электрических машин и их надежность в значительной мере зависят не только от правильной конструкции и расчета, но и от правильного выбора магнитных и изолирующих материалов, их свойств и качеств, а также от материалов конструктивных элементов, обеспечивающих требуемую механическую прочность.

Применяемые в электромашиностроении материалы делятся на три группы: конструктивные, активные и электроизоляционные.

Из конструктивных материалов изготавливаются части машины, несущие механическую нагрузку. В электромашиностроении применяются, в основном, те же конструктивные материалы, что и в общем машиностроении. К ним относятся: сталь, чугун, цветные металлы и пластмассы.

Активные материалы служат для проведения магнитного потока машины и электрического тока и делятся на токопроводящие и магнитопроводящие.

К токопроводящим элементам следует отнести также щетки, при помощи которых осуществляется съём тока с вращающихся обмоток через контактные кольца или кол-

ллектор. Щетки обычно изготавливаются на основе графита, угля или меди. Основным магнитопроводящим материалом является листовая легированная электротехническая сталь, содержащая от 2 до 5 % кремния. Присадка кремния уменьшает потери на гистерезис. Вследствие увеличения удельного электрического сопротивления стали, уменьшаются потери на вихревые токи. Сталь становится устойчивой к окислению и старению, но делается более хрупкой. В последние годы широко используется холоднокатаная текстурованная сталь с более высокими магнитными свойствами в направлении проката. Сердечник магнитопровода выполняется в виде пакета, собранного из листов штампованной стали [11, 20].

Сжатия, удары и изгибы, которым подвергаются сердечники статоров как при изготовлении (токарная обработка, штамповка, резка ленты и навивка сердечников), так и при их ремонтах, приводят к нарушению крупнозернистой структуры в материале, увеличению ее неоднородности и снижению подвижности граничных слоев из-за возникающих при этом напряжений (наклепа). Образование наклепа вызывает существенное снижение магнитной проницаемости и повышение коэрцитивной силы даже у статоров, изготовленных из кремнистых сталей [12].

Так, при двухпроцентном наклепе максимальная магнитная проницаемость электротехнической стали снижается более чем в два раза. Наклеп в 22 %, вполне возможный при изготовлении малогабаритных сердечников, приводит более чем к двукратному увеличению магнитных потерь.

Степень изменения магнитных свойств стали статора будет различной в зависимости от качества штамповки, условий извлечения обмотки и марки стали. При штамповке зона сильной деформации с резко ухудшенными магнитными свойствами распространяется на 0,5 – 3 мм от кромки среза в зависимости от величины зазора между пуансоном и матрицей и остроты режущего инструмента. Поэтому при нарезании пластин из стали марки Э41 шириной 30 мм и более влияние наклепа может не приниматься во внимание, но при ширине в 5 мм с этим приходится считаться, т.к. в последнем случае энергия коммутационного перемагничивания увеличивается более чем вдвое, а начальная магнитная проницаемость снижается в 3 раза [13].

Таким образом, влияние штамповки или резки на магнитную проницаемость и потери

зависят от отношения полной поверхности штамповки к поверхности деформированной зоны. Чем больше это отношение, тем меньше влияние механических операций, и чем ажурнее штамповка, тем сильнее выражен краевой эффект механической деформации.

При извлечении обмотки зона сильной деформации с резко ухудшенными магнитными свойствами распространяется на 5 – 10 листов стали от края пакета в зависимости от способа деструкции связующего. При извлечении обмотки из паза статора возникает ряд дефектов (распушение крайних пакетов, повреждение межлистовой изоляции) в стали статора, которые приводят к изменению ее магнитных свойств.

При извлечении обмотки из паза на статор действует сила по направлению извлекаемой обмотки. Эта сила превышает предел упругости материала, что приводит к пластической деформации более уязвимых листов, которые расположены на краях пакета. Эта деформация приводит к растяжению решеток кристаллов, и листы находятся в неоднородно напряженном состоянии, характеризующемся низкими магнитными свойствами. Растяжение решеток, в свою очередь, измельчает кристаллы, что приводит к снижению магнитных свойств материала, а именно уменьшается магнитная проницаемость и увеличивается коэрцитивная сила, по сравнению со сталью с крупнозернистой структурой [14, 15]. Влияние величины зерна на магнитные свойства электротехнической стали изображено на рисунке 1.

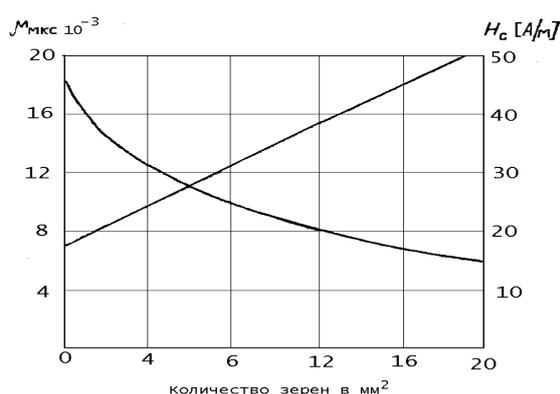


Рис. 1. Влияние величины зерна на магнитные свойства электротехнической стали

Это связано с тем, что в крупнозернистом ферромагнетике домены достигают больших размеров, чем в мелкозернистом. Кроме того, границы зерен всегда имеют ис-

каженную кристаллическую решетку, а содержащиеся в ферромагнетике примеси сосредотачиваются в промежутках между зернами, образуя на их границах магнитотвердую прослойку цементита и неметаллических включений, препятствующих прохождению магнитного потока. Поэтому у стали с крупнозернистой структурой процессы смещения границ при намагничивании встречают меньшее сопротивление со стороны гетерогенных включений, обволакивающих зерна.

Помимо этого сталь, имеющая крупнозернистую структуру, обладает совершенной кристаллографической текстурой.

Если в мелкозернистой электротехнической стали с площадью зерна в  $4 \text{ мм}^2$  степень совершенства текстуры не превышает 20 %, то у крупнозернистой с площадью зерна до  $50 \text{ мм}^2$  степень совершенства текстуры достигает 80 %. В результате этого полные потери в этих сталях при индукции 1,5 Тл равны 2,07 и 1,53 Вт/кг соответственно [16].

В процессе извлечения обмотки межлистовая изоляция может разрушаться по различным причинам. При повреждении межлистовой изоляции образуется металлическая связь между пластинами. Несколько пластин, соединенные между собой в электрической машине, при рассмотрении магнитных свойств представляются как одна пластина большей толщины. Увеличение толщины листов приводит к значительному снижению магнитной проницаемости и увеличению потерь на перемагничивание. Так, увеличение толщины на 0,1 мм приводит к снижению проницаемости на 5 – 10 % [17, 18].

Особенно повышенной чувствительностью к механическим воздействиям отличаются статоры, изготовленные из железоникелевых сплавов. Ухудшение магнитных свойств железоникелевых сплавов высокой проницаемости под действием деформаций приобретает катастрофические размеры: проницаемость и коэрцитивная сила изменяются в десятки раз.

Для устранения последствий наклепа и снятия внутренних напряжений в листовой стали перед изготовлением сердечников магнитомягкие материалы подвергаются рекристаллизационному отжигу, условия проведения которого для разных материалов различны. Листы электротехнической стали могут отжигаться в течение 1 – 1,5 часов при  $720 - 780^\circ\text{C}$  с последующим охлаждением в печи со скоростью, не превышающей  $60^\circ\text{C}/\text{ч}$ . Целесообразность отжига горячекатаной стали определяется величиной деформации и, как

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

видно из рисунка 2, при ширине заготовок менее 15 – 20 мм является неоспоримой.

Эффективность такого отжига тем значительнее, чем больше проницаемость стали и меньше магнитные потери, т.к. в этом случае относительное ухудшение свойств от резки или штамповки возрастает.

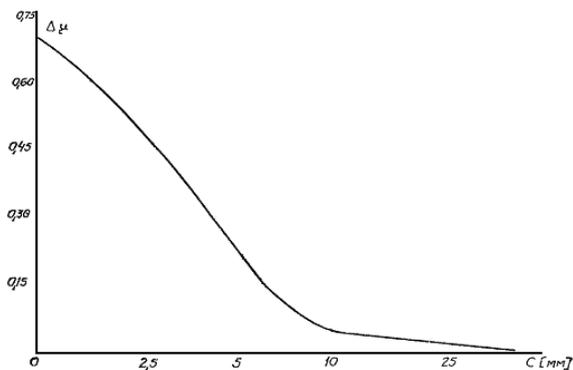


Рис. 2. Влияние ширины полосовой стали на увеличение проницаемости от отжига

Детали из железоникелевых сплавов отжигаются в зависимости от марки сплава при температуре 700 – 1200<sup>o</sup>C в сухом очищенном водороде или вакууме с определенной для каждого сплава выдержкой и скоростью охлаждения, в том числе и с применением магнитного поля [19].

Однако рекристаллизационный отжиг далеко не автономный процесс, т.к. на результате рекристаллизации сказывается предшествующее структурное состояние материала. Если величина наклепа не соответствует некоторой оптимальной величине, процесс рекристаллизации замедляется, и полное восстановление структуры материала не достигается. Наиболее благоприятные условия для нового роста крупных зерен возникают при наклепе не более 6 – 8 %. Поэтому при изготовлении сердечников необходимо следить за тем, чтобы в материале не возникали чрезмерные напряжения.

Несмотря на то, что механические воздействия на заготовки из отожженного материала недопустимы, технология сборки сердечников не исключает возможности возникновения в материале новых напряжений. Фиксация положения пластин из магнитомягкого материала в собранном пакете обычно осуществляется путем стягивания пакетов шпильками или болтами, иногда применяется клепка. Это неизбежно приводит к снижению магнитных свойств собранных сердечников, т.к. пластины магнитомягкого материала подвергаются сдавливанию и изгибу.

Наиболее значительное влияние прессующего давления на магнитные свойства магнитопроводов из электротехнической наблюдается в диапазоне индукций 1,4 – 1,7 Тл. С увеличением прессующего давления до 0,6 МН/м<sup>2</sup> индукция в холоднокатаной стали уменьшается с 1,65 Тл на 25 %, а ток холостого хода увеличивается в 2,2 раза. При этом максимум магнитной проницаемости смещается в область более низких индукций и, вследствие роста электрических потерь, происходит значительное увеличение полных потерь в стали.

Возникающая при стягивании пластин деформация изгиба также сопровождается значительным снижением магнитной проницаемости со смещением ее максимума в сторону низких индукций, причем уменьшение радиуса изгиба вызывает рост полных потерь.

Зачительно ухудшаются магнитные свойства от прессующих давлений в горячекатаной стали. При сдавливании пакета стали Э42 с усилием в 10 МН/м<sup>2</sup> потери в нем возрастают почти на 200 %.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что различные свойства электротехнической стали изменяют как ремонтные, так и технологические воздействия. В основном это негативные воздействия, исправить которые не всегда возможно, т.к., улучшая один параметр, резко ухудшается другой. Поэтому данные процессы надо сбалансировать таким образом, чтобы на выходе получился продукт с минимальными или легко восстанавливаемыми оптимальными свойствами.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Затраты энергии на перемагничивание магнитных материалов, являясь необходимой физической предпосылкой осуществления процессов смещения, с эксплуатационной точки зрения оказываются бесполезными. Достаточно сказать, что при передаче электрической энергии от электростанций к потребителю в генераторах, трансформаторах, электродвигателях теряется немало энергии, уходящей на перемагничивание. Учитывая, что передача электроэнергии сопровождается обычно ее многокаскадным трансформированием, потери энергии на перемагничивание в масштабах страны оказываются весьма значительными. Вызывается преждевременный износ оборудования. Поэтому удельные потери являются одной из важнейших харак-

теристик магнитомягких материалов не только с точки зрения понимания физической сущности процессов перемагничивания, но и с вполне самостоятельной технико-экономической стороны [18].

При этом рассматриваемая задача может решаться в двух вариантах: путем оценки угла или абсолютной величины удельных потерь. Второе решение наиболее существенно для электрических машин.

При работе электрической машины в ее активных материалах возникают потери энергии. К ним относятся магнитные потери в стали магнитопровода и электрические потери в проводниках обмоток. При вращении машины возникают механические потери, вызываемые трением. Кроме того, существуют добавочные потери в обмотках и в стали магнитопровода.

Определение удельных магнитных потерь в стали статора возможно методом ваттметра и амперметра. Данный метод основан для определения удельных магнитных потерь от 0,3 до 50,0 Вт/кг и действующего значения напряженности магнитного поля от 100 до 2500 А/м при частотах перемагничивания 50–400 Гц [19].

Удельные потери определялись для трех сердечников статора асинхронных двигателей мощностью 15 кВт. Два двигателя после первого и второго ремонтов соответственно, а третий – вышедший из эксплуатации.

Сердечник статора, набранный из изолированных листов электротехнической стали, представляет собой образец кольцевой формы. Данные образцы подключались к источнику питания для намагничивания и к контрольно-измерительным приборам. Схема установки приведена на рисунке 3.

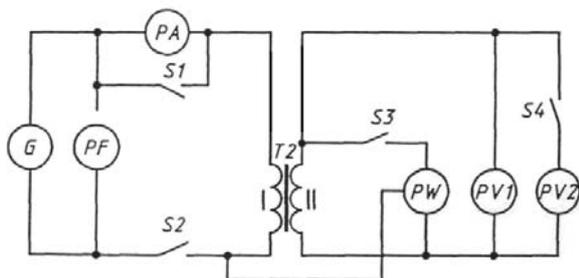


Рис. 3. Схема для измерений ваттметровым методом

Источник питания  $G$  для намагничивания образцов имеет регулятор напряжения со стабилизатором частотой 50 Гц. Номинальная мощность источника при частоте пере-

магничивания 50 Гц не менее 0,45 кВА на 1 кг массы образца.

Частотомер PF служит для измерения частоты с погрешностью, не выходящий за пределы  $\pm 0,2\%$ .

Амперметр PA измеряет действующее значение намагничивающего тока для контроля нагрузки токовой цепи ваттметра.

Ваттметр PW для измерения активной мощности и последующего определения удельных магнитных потерь имеет предел измерения от 0,75 до 30 Вт.

Вольтметры PV1 – для измерения средневыпрямленного значения напряжения и последующего определения амплитуды магнитной индукции и PV2 – для измерения действующего значения напряжения и последующего определения коэффициента формы его кривой имеют предел измерения от 30 до 100 В.

T2 – кольцевой образец, имеющий намагничивающую I и измерительную II обмотки. Последние расположены равномерно по длине окружности образца, намагничивающая обмотка поверх измерительной.

Число витков измерительной обмотки  $W_2$  выбирается в соответствии с чувствительностью приборов, а намагничивающей обмотки  $W_1$  вычисляется по формуле

$$W_1 \geq \frac{\pi H(D+d)}{2I}, \quad (1)$$

где  $H$  – максимальное значение напряженности поля, которое требуется создать в образце, А/м;  $I$  – максимальный ток, не вызывающий нагревание обмотки и, как следствие, нагревание образца и соответствующий рабочей части шкалы применяемого амперметра, А.

Максимальное значение напряженности поля, которое требуется создать в образце, выбирается в соответствии с магнитной индукцией. Амплитуда магнитной индукции, соответствующая рабочему состоянию данных двигателей, в среднем, равна 1 Тл, следовательно,  $H$  не меньше 110 А/м.

Согласно ГОСТ 8.377, максимальный ток не должен превышать 10 А. Следовательно, выбранный обмоточный медный провод сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  нагреваться не будет.

Перед определением магнитных характеристик кольцевого образца должны быть измерены его наружный и внутренний диаметры и определена площадь поперечного сечения.

У сердечников испытываемых статоров наружный диаметр составляет  $D = 0,272 \text{ м}$ , а внутренний  $d = 0,185 \text{ м}$ . Следовательно,

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2007

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  
ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

площадь поперечного сечения  $S$  образцов в квадратных метрах вычисляется по формуле

$$S = \frac{2m}{\gamma\pi(D+d)}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса образца, кг;  $\gamma$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Массу образца измеряют с погрешностью не более  $\pm 0,2\%$ . Для данных образцов  $m = 24,4$  кг. Плотность материала для электротехнической стали марки 2013 составляет 7820 кг/м<sup>3</sup> [20].

Для вольтметра PV1, отградуированного в средневыпрямленных значениях, напряжение  $U_{cp}$ , В, соответствующее заданной амплитуде магнитной индукции  $B_{max}$ , Тл, и частоте перемагничивания  $f$ , Гц, рассчитывают по формуле

$$U_{cp} = 4fSW_2B_{max}\left(1 - \frac{r_2}{r_3}\right), \quad (3)$$

где  $f$  – частота перемагничивания, Гц;  $r_2$  – сопротивление обмотки II, Ом;  $r_3$  – эквивалентное сопротивление приборов и устройств, соединенных с обмоткой II образца T2, Ом.

Величиной  $r_2/r_3$  в формуле (3) пренебрегается, т.к. ее значение не превышает 0,002 [21].

Для машин переменного тока частота перемагничивания равна частоте питающей сети [18].

Так как отсутствует катушка для компенсации магнитного потока вне образца, рассчитывается поправка  $\Delta U$  по формуле [21]

$$\Delta U = 4fW_1W_2\mu_0(S_0 - S)\frac{1}{I_{cp}}I_{max}, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $S_0$  – площадь поперечного сечения измерительной обмотки образца, м<sup>2</sup>;  $I_{cp}$  – средняя длина магнитной силовой линии, м;  $I_{max}$  – амплитуда тока, А.

Для образцов кольцевой формы средняя длина магнитной силовой линии определяется из выражения

$$I_{cp} = \frac{\pi}{2}(D+d). \quad (5)$$

Амплитуда тока рассчитывается в зависимости от амплитуды падения напряжения  $U_{Rmax}$ , В, на резисторе сопротивлением  $R$ , Ом, включенном в намагничивающую цепь, по формуле

$$I_{max} = \frac{U_{Rmax}}{R}. \quad (6)$$

Определение удельных магнитных потерь основано на измерении активной мощности, расходуемой на перемагничивание

образца и потребляемой приборами PV1, PV2, PW.

На установке (рисунок 3) ключи S2, S3, S4 замкнуты, а ключ S1 – разомкнут. В этот момент устанавливается напряжение  $U_{cp} + \Delta U$ , В, по вольтметру PV1; частота перемагничивания  $f$ , Гц; по амперметру PA проверяется, что ваттметр PW не перегружен. Затем, замыкается ключ S1 и размыкается ключ S2.

Источником питания регулируются показания вольтметра PV1 для заданного значения напряжения и измеряется действующее значение напряжения  $U_1$ , В, вольтметром PV2 и мощность  $P_m$ , Вт, ваттметром PW.

После проведения измерений, полученные данные были занесены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерений

№ образца	Кол-во ремонтов	Измеряемые величины			
		PF	PW	PV1	PV2
		$f$ , Гц	$P_m$ , Вт	$U_{cp} + \Delta U$ , В	$U_1$ , В
1	1	50	10	9,558	10,515
2	2	50	15,5	9,558	10,515
3	5	50	19,8	9,558	10,515

Коэффициент формы кривой напряжения  $K_\phi$  на обмотке II образца рассчитывают по формуле

$$K_\phi = \frac{U_1}{U_{cp}}. \quad (7)$$

Удельные магнитные потери  $P_{y\delta}$ , Вт/кг, образцов определяют из выражения

$$P_{y\delta} = \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{W_1}{W_2} \cdot P_m - \frac{U_1^2}{r_3} \right) \cdot \left( 1 + \frac{r_2}{r_3} \right). \quad (8)$$

Величиной  $U_1^2/r_3$  пренебрегают, т.к. она не превышает 0,2 % от  $W_1/W_2 \cdot P_m$ .

Таким образом, удельные магнитные потери для образцов 1, 2, 3 составили: 2,868; 4,447; 5,680 Вт/кг соответственно.

Для нового двигателя удельные магнитные потери в стали сердечника составляют 2,5 Вт/кг [18].

В результате, проведенные измерения показали, что удельные магнитные потери увеличиваются после каждого ремонта, и величина этих потерь определяется опытным путем.

Полные потери в стали статора  $P_{ст.осн}$ , Вт, увеличиваются за счет увеличения удельных магнитных потерь по закону:

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right)^\beta \left( k_{Да} B_a^2 m_a + k_{ДЗ} B_z^2 m_z \right), \quad (9)$$

где  $p_{1,0/50}$  – удельные магнитные потери, определяемые опытным путем при индукции  $B = 1$  Тл и частоте перемагничивания  $f = 50$  Гц, Вт/кг;  $\beta$  – показатель степени, зависящий от марки стали сердечника;  $k_{Да}$  и  $k_{ДЗ}$  – коэффициенты, учитывающие увеличение потерь в стали зубцов и ярма магнитопровода по технологическим причинам;  $B_a$  и  $B_z$  – индукция ярма и зубцовой части статора машины, Тл;  $m_a$  и  $m_z$  – масса ярма и зубцовой части статора, кг.

Для асинхронных двигателей мощностью 15 кВт масса ярма и зубцовой части статора составляют 18,53 и 5,28 кг, а коэффициенты  $k_{Да}$  и  $k_{ДЗ}$  – 1,6 и 1,8 соответственно. Индукция ярма  $B_a = 1,6$  Тл и зубцовой части  $B_z = 1,92$  Тл при номинальном режиме работы двигателя.

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя непосредственно зависит от превышения основных потерь в стали  $P_{ст.осн}$ :

$$\Delta V_{пов1} = K \cdot \frac{P'_{э.л1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1}, \quad (10)$$

где  $\Delta V_{пов1}$  – превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, °С;  $K$  – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду;  $P_{ст.осн}$  – основные потери в стали статора, Вт;  $D$  – внутренний диаметр статора, м;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности;  $P'_{э.л1}$  – электрические потери в пазовой части статора.

Для данного типа двигателей  $K = 0,2$ . Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1 = 108$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Электрические потери в пазовой части статора составляют  $P'_{э.л1} = 348$  Вт из расчетных данных [18].

Исходя из расчетных данных для данного типа двигателя [18], среднее превышение температуры обмотки статора  $\Delta V'_1$ , °С над температурой воздуха внутри двигателя рассчитывается по формуле

$$\Delta V'_1 = \frac{(\Delta V_{пов1} + \Delta V_{узл1}) 2l_1 + (\Delta V_{узл1} + \Delta V_{пов1}) 2l_{л1}}{I_{ср1}}, \quad (11)$$

где  $\Delta V_{уз.л1} = 3,15$  °С – перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора;  $l_1 = 0,14$  м – общая длина проводников фазы обмотки статора;  $\Delta V_{узл1} = 0,67$  °С – перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей;  $\Delta V_{пов.л1} = 12,23$  °С – превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины;  $l_{л1} = 0,23$  м – длина лобовой части;  $l_{ср1} = 0,742$  м – средняя длина витка.

Полные потери в стали:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб}, \quad (12)$$

где  $P_{ст.доб} = 93,1$  Вт – добавочные потери в стали.

Сумма потерь в двигателе  $\sum P$  при номинальном режиме и расчетной температуре:

$$\sum P = P_{ст} + P_{мех} + P_{э2} + P_{э1} + P_{эщ} + P_{доб}, \quad (13)$$

где  $P_{мех} = 117$  Вт – механические потери в двигателе;  $P_{э2} + P_{э1} + P_{эщ} + P_{доб} = 1410,5$  Вт – сумма электрических потерь в фазах обмотки ротора, в фазах обмотки статора, в щеточном контакте и добавочных электрических потерь соответственно.

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя  $\sum P'_э$ , Вт, рассчитывается по формуле

$$\sum P'_э = \sum P' - (1 - K)(P'_{э.л1} + P_{ст.осн}), \quad (14)$$

где

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{э.1} + P_{э.2}), \quad (15)$$

где  $k_p$  – коэффициент увеличения потерь по сравнению с полученными для расчетной температуры.

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды  $\Delta V_э$ , °С, определяется по формуле

$$\Delta V_э = \frac{\sum P'_э}{(S_{кор} \cdot \alpha_э)}, \quad (16)$$

где  $S_{кор} = 0,99$  м<sup>2</sup> – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса;  $\alpha_э = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) – коэффициент подогрева воздуха.

Среднее превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды  $\tau$ , °С составляет:

$$\tau = \Delta V_1 + \Delta V_э, \quad (17)$$

где  $\Delta V_э = 65,3$  °С – превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды.

Результаты данного теплового расчета заносятся в таблицу 2.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  
ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Таблица 2

Результаты расчета

№ двигателя	Кол-во ремонтов	$P_{уд}$ , Вт/кг	$P_{см.срн.}$ , Вт	$P_{см.}$ , Вт	$\Delta V_{г}$ , °C	$\tau$ , °C
1	1	2,87	236,53	329,63	72,98	102,28
2	2	4,45	366,75	459,85	75,71	106,92
3	5	5,68	468,44	561,54	77,53	111,15

По данным таблицы 2 можно сделать вывод, что температура двигателя при номинальном режиме работы увеличивается после каждого ремонта. Это, прежде всего, связано с ростом удельных магнитных потерь в сердечнике статора, и влечет за собой уменьшение послеремонтного ресурса двигателя по закону:

$$D = 10 \cdot 2^{140 - \tau/8}, \quad (18)$$

где  $D$  – ресурс двигателя, лет.

График зависимости послеремонтного ресурса асинхронного двигателя  $D$ , год, от превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды  $\tau$ , °C, представлен на рисунке 4.

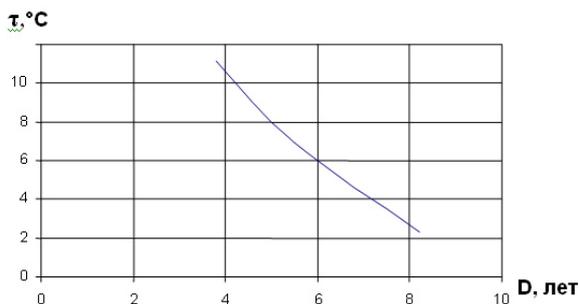


Рис. 4. Зависимость послеремонтного ресурса двигателя от превышения его температуры над температурой среды

Таким образом, работа, выполненная по гранту Президента РФ № МК-7964.2006.8, позволила практически определить зависимость послеремонтного ресурса асинхронного двигателя от негативного воздействия повышения температуры вследствие влияния удельных магнитных потерь в сердечнике статора: с ростом удельных магнитных потерь увеличивается средняя температура сердечника статора, что приводит к недопустимому перегреву изоляции обмотки и преждевременному старению двигателя целом.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.

2. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины. Теория, расчет, элементы проектирования: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.

3. Хомутов С.О. Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе: дис.... канд. техн. наук. – Барнаул, 1999. – 215 с.

4. Мандыркин С.А. Ремонт электродвигателей. – М.: Энергия, 1965. – 146 с.

5. Маршак Е.Л., Уманцев Р.Б. Ремонт электрических машин общепромышленного применения. – М.: Энергия, 1972. – 280 с.

6. Каминский С.Г. Разработка методов вибродиагностирования и восстановления электроприводных нефтепромысловых насосных агрегатов: дис.... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 204 с.

7. Справочник по ремонту крупных электродвигателей / под ред. Р.И. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 203 с.

8. Коварский Е.М. Ремонт электрических машин: учеб., 5-е изд. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.

9. Герасимов В.Г. Электротехнические материалы: в 3 т. Т. 1 справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.

10. Токов М.И. Механические расчеты деталей электрических машин: учеб. пособие. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1977. – 67 с.

11. Хоникомб Р.В. Пластическая деформация металлов / под ред. Б.Я. Любова. – М.: Мир, 1972.

12. Кан К.Н. Механическая прочность эпоксидной изоляции: учеб. пособие. – Л.: Энергия, 1973. – 165 с.

13. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна: учеб. / В.В. Астахин, В.В. Трезвов, И.В. Суханова. – М.: Химия, 1986. – 160 с.

14. Белый М.И. Магнитомягкие материалы при симметричном перемагничивании. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 138 с.

15. Веников И.М. Технология и расчеты при ремонте двигателей переменного тока: учеб.: – М.: Энергия, 1970. – 224 с.

16. Слоним Н.М. Испытание асинхронных двигателей при ремонте: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 88 с.

17. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.

18. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.

19. Кузнецов А.П. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 2 справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 608 с.

20. ГОСТ 12119.4-98. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля; введ. 01.07.99. – М.: Изд-во стандартов. – 12 с.

21. ГОСТ 8.377-80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статистических магнитных характеристик; введ. 01.07.81. – М.: Изд-во стандартов. – 24 с.