



ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

Энергоэффективный подход к ремонту электрических машин

Багрушин О. Е.,

директор ООО “Ремонтно-механическое предприятие”, Тула

Рассмотрены проблемы совершенствования систем изоляции электрических машин (электродвигателей). Применяемые методы пропитки изоляции усложняют операции по демонтажу обмотки электродвигателей при их ремонте. Подробно представлен метод гидролитической деструкции связующего вещества в изоляции, который позволяет сохранить исходные значения тепловых потерь в электрической машине и ее КПД и практически полностью восстановить исходный ресурс.

Ключевые слова: электродвигатели, ремонт, системы изоляции, демонтаж, метод гидролитической деструкции.

Развитие современного силового электропривода характеризуется рядом особенностей, связанных как с оснащением электродвигателей и генераторов различными вспомогательными, измерительными элементами, комплексами систем защит, системами контроля текущего состояния, так и с применением новейших систем изоляции.

Основными задачами при совершенствовании систем изоляции являются повышение ее долговременной электрической прочности и увеличение теплопроводности, что уменьшает материалоемкость при производстве электрических машин и существенно упрощает процессы утилизации теплоты, образующейся при протекании электрического тока в обмотках. Это в свою очередь расширяет возможности использования воздуха в качестве основного теплоносителя, упрощает конструкции крупных электрических машин и снижает эксплуатационные затраты.

Практически революционным толчком к совершенствованию основных параметров изоляции, а также к повышению технологичности производства вращающихся электрических машин послужило развитие появившейся в семидесятых годах прошлого столетия системы изоляции по технологии “Монолит” (Global VPI). Ее главной особенностью является применение вакуум-нагнетательной пропитки (vacuum-pressure impregnated — VPI) статора с уже уложенной обмоткой, изоляция которой выполнена “сухими” (почти не содержащими связующего) изоляционными лентами. Данная технология, помимо снижения затрат при производстве, значительно повышает долговременную электрическую

прочность изоляции, позволяет уменьшить ее толщину и как следствие — повысить теплопроводность.

Вместе с тем при использовании данной технологии резко снижается ремонтпригодность электрических машин: ведь при ремонте необходимо воспроизвести заводскую технологию производства, кроме того, эпоксидный компаунд, глубоко проникая в изоляцию, “намертво” приклеивает обмотки к дну и стенкам паза машины, создавая единую монолитную структуру (отсюда название технологии), что чрезвычайно усложняет операции по демонтажу обмотки. Электродвигатели с такой обмоткой длительное время вообще считались неремонтпригодными, в частности электродвигатели серий STD, ВАО, 4АЗМ производства заводов “Электротяжмаш-Привод” и НПО “ЭЛСИБ”, а также электродвигатели зарубежных производителей. Поскольку ремонт электрических машин — экономически обоснованная процедура (стоимость капитального ремонта не превышает 30 % стоимости нового оборудования для крупных электрических машин), решение данных проблем представляет чрезвычайный интерес для исследователей.

Если проблема воспроизведения заводской технологии вакуум-нагнетательной пропитки постепенно решается (некоторые ремонтные предприятия оснащают свои пропиточные участки соответствующим оборудованием), то ситуация с проблемой демонтажа обмотки до настоящего времени остается сложной. Ведь наиболее применимый и технологичный сегодня метод термического разложения изоляции при ремонте монолитных электродвига-

телей влечет за собой ряд негативных последствий: из-за необходимости нагрева до высоких (по сравнению с обычными электродвигателями) температур активное железо в значительной степени теряет свои свойства — происходит выгорание лакового изоляционного слоя листов магнитопровода, кроме того, изменяются магнитные свойства железа. В результате уменьшаются мощность и КПД двигателя и, как следствие, снижается его энергоэффективность. Кроме того, массовое применение данного метода создает комплекс экологических проблем: при электроремонтном производстве с объемом 2500 электродвигателей в год сжигается до 3 т электроизоляционных материалов, что сопровождается выбросом в атмосферу большого количества токсичных веществ первого и второго классов опасности. Химические способы разложения связующего оказываются малоэффективными: эпоксидные пропиточные составы весьма стойки к химическому воздействию. Наиболее деликатным по отношению к активному железу является механический способ демонтажа, но наряду с чрезвычайной трудоемкостью он также не в полной мере спасает железо (в процессе демонтажа оно деформируется и распушается).

Ввиду того что производство и ремонт электротехнической продукции помимо технологической сложности характеризуются наличием факторов, влияющих на надежность и при этом не поддающихся теоретическим расчетам, большое значение имеют практические результаты, проверенные временем. В настоящей статье рассматривается один из методов разборки монолитных статоров электрических машин, имеющий очевидные преимущества перед традиционными.

В ООО “Ремонтно-механическое предприятие” в течение нескольких лет применяется метод гидролитической деструкции связующего в изоляции, который позволяет считать ремонтпригодными практически все электродвигатели переменного тока, выпускаемые промышленностью. Суть метода заключается в следующем. Статор помещается в емкость, заполненную почти на 80 % технической водой. Емкость герметически закрывается, в нее подается углекислый газ до создания давления 10 – 12 кгс/см², после чего полученный раствор нагревается до 150 – 160 °С. В процессе нагрева давление повышается до 16 – 18 кгс/см².

В ходе реакции гидролиза для размягчения связующего при растворении CO₂ в воде начинается барботаж, образуется угольная

кислота H₂CO₃. Это обратимая реакция: H₂O + CO₂ ↔ H₂CO₃. Под воздействием слабой угольной кислоты, действие которой усиливается повышением температуры, органические вещества гидролизуются в растворимые или легколетучие, реакция протекает 12 – 16 ч практически до полного разложения органического связующего.

При использовании данного метода не происходит коробления активного железа, разрушения лакового слоя, ухудшения магнитных свойств, так как температура нагрева практически не превышает рабочих температур по классу нагревостойкости *F*. Чтобы понять преимущества предлагаемого метода, возможные последствия (как экономические, так и экологические) его применения и определить влияние на энергоэффективность предприятия в целом, рассмотрим метод более подробно.

Задача обеспечения энергоэффективности производства для руководителя предприятия не может быть обособленной, поскольку в борьбе за снижение себестоимости выпускаемой продукции учитывается комплексный показатель, характеризующий стоимость эксплуатации оборудования и включающий в себя помимо затрат на энергообеспечение также амортизационные отчисления, стоимость обеспечения жизнеспособности (текущие ремонты, обслуживание) и ряд других показателей. Если, например, для получения 5 % экономии электроэнергии требуется внедрение весьма дорогостоящих и не вполне надежных устройств, расходы на амортизацию и ремонт которых не обеспечат окупаемость проекта в разумный период времени, вряд ли собственник (руководитель) предприятия решится на такой шаг. Ведь задачи обеспечения энергоэффективности и надежности оборудования зачастую противоречат друг другу.

Общеизвестно, что для обеспечения максимальных КПД и коэффициента мощности асинхронного двигателя необходимо, чтобы он работал с номинальной нагрузкой, т. е. при номинальном токе в обмотках. При этом тепловые потери и температура обмотки пропорциональны квадрату тока в ней, и в номинальном режиме температура обмотки будет максимальной. Надежность электротехнического оборудования зависит прежде всего от надежности изоляции, поскольку до 80 % выходов из строя оборудования связано с разрушением именно изоляции. Она подвержена процессам старения, и тепловое старение вносит наибольший вклад в процесс постепенной утраты свойств изоляции. Известное правило “десяти градусов” гласит:

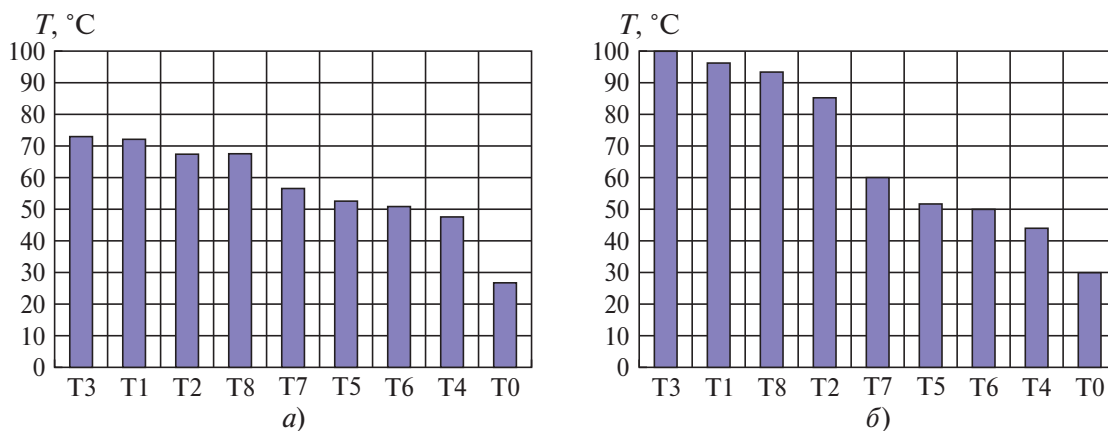


Рис. 1. Диаграммы распределения температур в узлах электродвигателей мощностью 0,55 кВт (а) и 5,5 кВт (б):

$T0$ — температура окружающей среды; $T1$ — температура в лобовой части обмотки статора со стороны вентилятора; $T2$ — температура обмотки статора в средней части паза; $T3$ — температура в лобовой части обмотки статора со стороны вала; $T4$ — температура корпуса со стороны вентилятора; $T5$ — температура в средней части корпуса; $T6$ — температура корпуса со стороны вала; $T7$ — температура стали статора в средней части; $T8$ — температура ротора

срок службы изоляции уменьшается вдвое при повышении рабочей температуры изоляции на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основное направление развития электротехники связано прежде всего со снижением материалоемкости оборудования, что неизбежно влечет за собой повышение рабочих температур активной части устройств, повышает тепловую нагрузку на изоляцию. Это приводит к снижению надежности оборудования, т. е. возникает дилемма: либо оборудование будет работать долго, но при этом потреблять слишком много энергии, либо придется столкнуться с неизбежностью ремонта при его эксплуатации. Поскольку второй вариант, очевидно, возобладает, имеет смысл предусмотреть возможные последствия воздействия технологических операций при ремонте на свойства оборудования.

Для наглядности рассмотрим потери энергии в электрической машине и основной тепловой поток в ней. Основные потери в электродвигателе делятся на электрические, потери на перемагничивание (магнитные потери), механические, потери на охлаждение. Все они согласно законам термодинамики приводят к нагреву элементов и рассеиванию теплоты в окружающую среду. Поскольку данная статья касается в основном надежности изоляции, будем учитывать только те потери, которые в наибольшей степени влияют на ее температурное состояние: электрические потери в обмотке и потери на перемагничивание.

Согласно основному закону термодинамики передача теплоты направлена только в одну сторону — от наиболее горячих тел к наиболее холодным. Наиболее горячим элементом электрической машины является об-

мотка, так как снижение потерь в ней сопряжено с увеличением расхода дорогостоящей меди и удорожанием электрической машины. Основной поток теплоты в статоре асинхронного двигателя от наиболее нагретой обмотки передается через изоляцию в зубцы магнитопровода, от них — к спинке и далее рассеивается в окружающую среду через корпус с помощью обтекающего потока теплоносителя. Это не касается мощных машин с непосредственным охлаждением обмотки, у которых отвод теплоты от медных проводников осуществляется по другой схеме — передается теплоносителю в полых проводниках и утилизируется в теплообменниках. Интенсивность теплового потока зависит от разности температур и теплопроводности конструктивных элементов. Наименьшей теплопроводностью в двигателе обладает изоляция, и работы по ее повышению ведутся с переменным успехом многими институтами во всем мире. Что касается обеспечения разности температур, необходимой для эффективной передачи теплоты от горячей обмотки к железу статора, то здесь на первом месте борьба с потерями на перемагничивание, так как их наличие обуславливает тепловыделение в железе и повышение его собственной температуры. Наиболее наглядно это видно на диаграммах распределения температур (рис. 1) в узлах электродвигателей, полученных по результатам тепловых испытаний.

Потери на перемагничивание состоят из потерь на гистерезис, на вихревые токи и магнитное последствие. Потери на гистерезис и на магнитное последствие зависят от свойств электротехнической стали (в частности, они пропорциональны площади статиче-

ской петли гистерезиса) и нормируются в России по ГОСТ 21427.1–83. Снижение потерь на вихревые токи достигается применением наборных сердечников из тонких листов электротехнической стали, изолированных один от другого лаковым слоем.

Следует отметить, что наибольшие потери на перемагничивание отмечаются именно в зубцовом слое магнитопровода, поскольку магнитная индукция в нем достигает наибольших значений, что связано с уменьшением эффективной площади сердечника за счет вырубки пазов. Таким образом, в электрической машине основные потери (электрические и магнитные) сконцентрированы в определенном месте: в зоне зубцового слоя, в некоем полом цилиндра, внутренняя поверхность которого образована расточкой статора, а внешняя — поверхностью, огибающей дно пазов, и отвод теплоты от обмотки статора затруднен из-за повышенного выделения теплоты в зубцовой зоне магнитопровода даже в новой машине, ранее не подвергавшейся ремонту.

В процессе эксплуатации магнитные свойства электротехнической стали изменяются (как и изоляции), т. е. сталь подвергается старению. Согласно ГОСТ 21427.1–83 “Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая” коэффициент старения по удельным магнитным потерям для сталей марок 3311, 3411, 3412, 3413, 3414, 3415 не должен превышать 4 %, для сталей марок 3404, 3405, 3406, 3407, 3408, 3409 — 2 %. Коэффициент старения определяется после нагрева в течение 120 ч при 120–150 °С в зависимости от марки стали. В настоящее время исследованы причины увеличения магнитных потерь в электротехнической анизотропной стали из-за наличия в ней неметаллических включений. Выявлено, что основная причина роста потерь на магнитный гистерезис связана с искажениями доменной структуры, в частности, негативное воздействие оказывают примеси углерода и азота. Выделяющаяся фаза неметаллических включений (Fe_3C , Fe_2N , $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$) нарушает доменную структуру стали, приводит к многочисленным искривлениям и разрывам доменных границ вблизи мелкодисперсных включений. Это объясняется влиянием температуры и механическими воздействиями.

Далее более детально проанализируем процессы, происходящие в ходе термического разложения изоляции (выжигания) обмоток при ремонте общепринятыми методами, их влияние на потери и надежность электродвигателей.

Влияние выжигания на свойства магнитопровода электрической машины. Общепринятый процесс демонтажа обмотки происходит следующим образом. Одно или несколько изделий загружают в печь, оснащенную температурным регулятором, после чего их нагревают до 220–300 °С и выдерживают в течение 3–10 ч. Температуру и время выдержки варьируют в зависимости от конструкции и типа применяемой изоляции. Суть процесса — тепловое разрушение органического связующего, в том числе и за счет процессов окисления. Необходимо отметить, что процесс окисления связующего в изоляции сопряжен с дополнительным тепловыделением, а в ряде случаев приводит к неконтролируемому горению выделяющихся в процессе разложения изоляции газов.

В ходе процесса различные участки статора (ротора) электрической машины нагреваются неравномерно, наиболее высокой температуре подвергаются участки, содержащие наибольшее количество изоляции. Это, как правило, зубцовая зона магнитопровода (дополнительные негативные последствия неравномерности нагрева рассмотрены ниже). В результате нагрева помимо “полезного” процесса разрушения связующего в изоляции происходит разрушение изоляционного слоя между пластинами электротехнической стали, что впоследствии приводит к резкому росту магнитных потерь на вихревые токи. Обгорание изоляционного лакового слоя наблюдается чаще всего в поверхностных слоях вследствие облегченного доступа кислорода, а в зубцовой зоне — еще и за счет более высокой температуры. Это легко увидеть на листах, извлеченных из пакета магнитопровода: по всему периметру листа на глубину 2–10 мм от края видны цветные изменения и отсутствие характерного лакового блеска, зубцовая же зона, как правило, оказывается вообще лишенной лакового покрытия, что показано на рис. 2.

Кроме того, из-за нагрева происходит ускоренное старение железа, которое вызывает рост потерь на гистерезис. В результате вышеуказанных явлений общий рост потерь в железе может достигать 50–200 %. Много это или мало? С одной стороны, потери в железе не являются определяющими для электрической машины, с другой — рост потерь в магнитопроводе неизбежно (из-за снижения реактивного сопротивления обмотки) приводит к увеличению тока и потерь холостого хода. Таким образом, совокупный рост потерь исчисляется процентами, а в ряде случаев — десятками процентов.



Рис. 2. Внешний вид зубцовой зоны после тепловых испытаний

Для наглядности рассмотрим диаграмму (рис. 3), характеризующую значения КПД для различных классов энергоэффективности трехфазных асинхронных двигателей по стандарту IEC 60034-30. Из диаграммы видно, что различие значений КПД классов IE2 и IE1 для мощностей выше 75 кВт составляет не более 1 – 2 %. При этом для достижения более высоких КПД производителям приходится идти на существенное удорожание своей продукции, так как повышение эффективности требует применения весьма затратных технологических решений, например, использования более дорогих электротехнических сталей с улучшенными магнитными свойствами и уменьшенными магнитными потерями, введения дополнительных операций по повышению свойств электротехнической стали после механической

обработки, использования меди вместо алюминия при изготовлении обмоток ротора.

Таким образом, применение традиционного выжига при ремонте электродвигателей сводит на нет все усилия производителей по снижению потерь и повышению КПД электропривода, делая бессмысленными связанные с этим затраты потребителей их продукции. Помимо ухудшения энергетических показателей подобные технологии ремонта приводят к снижению надежности оборудования и уменьшению срока его службы. Другими словами, **потребитель за счет возросшего после ремонта энергопотребления оплачивает своими деньгами разрушение собственного же оборудования.** Как это происходит? Выше было отмечено, что основные потери и тепловыделение в электрической машине локализованы в зубцовом слое. Дополнительные потери (на гистерезис и вихревые токи), вызванные воздействием высокой температуры при выжиге, возникают в наиболее “пострадавших” участках, т. е. все в том же зубцовом слое. Следовательно, самая горячая часть машины становится еще горячее, что определяет ускоренное (нередко в десятки и сотни раз) тепловое старение изоляции и быстрый выход ее из строя.

Помимо упомянутых факторов, влияющих на состояние магнитопровода и снижающих эксплуатационные характеристики и надежность электрических машин при применении выжига, рассмотрим воздействие температуры на другие части машин и возможные последствия.

Влияние выжига на корпусные элементы и конструкцию в целом. При применении тра-

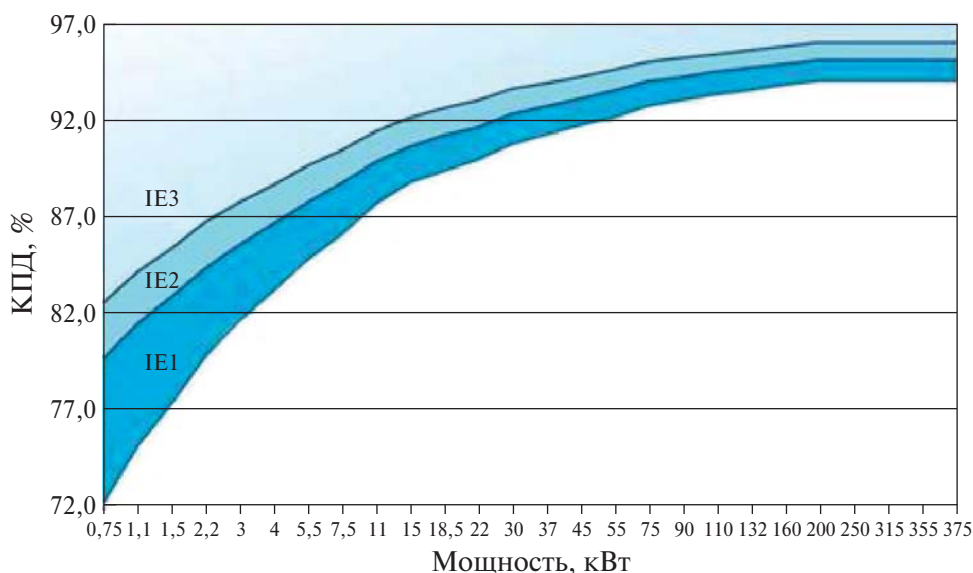


Рис. 3. Диаграмма изменения КПД электродвигателей для различных классов энергоэффективности

диционного выжига в печах, как уже отмечалось, неизбежна значительная разница температур нагрева различных элементов, что приводит к короблению конструкции. Особенно это характерно для электрических машин в сварных корпусах, изготовленных из относительно тонкого листового металла (электродвигатели серий 4АЗМ, ДАЗО4, А4, двигатели и генераторы иностранных производителей — АBB, LEROY SOMER и др.), а также для электродвигателей в алюминиевых корпусах. Практически на каждом ремонтном предприятии имеются случаи, когда в результате выжига машина была безвозвратно испорчена из-за коробления до такой степени, что ротор не удавалось ввести в расточку статора. Однако даже когда искажение геометрических размеров в результате коробления не столь очевидно, оно в большинстве случаев в той или иной степени присутствует. Искажение формы расточки в результате коробления, угловые смещения посадочных поверхностей приводят к возникновению статического эксцентриситета воздушного зазора (он становится неодинаковым в разных местах), а это ведет к росту вибраций как в высокочастотной области, так и в рабочем диапазоне. Более того, из-за эксцентриситета зазора некоторые участки магнитопровода начинают работать с насыщением зубцового слоя, что влечет за собой дополнительный нагрев этих участков и рост вибрации.

В результате коробления нередко ослабевает прессовка пакета магнитопровода, особенно в зубцовой зоне, где чаще всего полностью выгорает лаковый изоляционный слой и образуются зазоры между листами. При этом возникают значительные вибрации отдельных листов железа под действием электромагнитных сил, как правило, при удвоенной частоте сети — 100 Гц. Это крайне негативное явление приводит к истиранию изоляции вибрирующими листами, что в конечном итоге вызывает пробой изоляции, а также электроэрозию участков магнитопровода, сопровождающуюся появлением в полости двигателя порошка окислов железа коричневатого цвета. В некоторых случаях вибрация и эрозия железа могут даже привести к излому зубцов на отдельных листах и повреждению изоляции этими обломками. Особенно это характерно для относительно мощных машин, не имеющих в своей конструкции нажимных пальцев и плит с возможностью уплотнения пакета магнитопровода.

Также коробление не лучшим образом сказывается на опорной системе двигателя:

крайне редко после выжига выдерживается параллельность плоскости опорных лап и оси вращения двигателя в пределах норм, определенных ГОСТ 8592—79, что значительно усложняет монтажные, профилактические работы, выполнение операции центровки двигателя с потребителем, способствует появлению ослаблений в опорной системе, ухудшает вибрационное состояние.

Таким образом, активная часть электрической машины подвергается усиленному воздействию сразу двух неблагоприятных факторов — температурному и вибрационному (механическому), что резко сокращает срок службы отремонтированного оборудования и формирует устойчивое мнение о невозможности восстановления первоначальной надежности двигателя при ремонте.

На основе опыта применения предлагаемого метода в ООО “Ремонтно-механическое предприятие” можно утверждать, что он практически лишен недостатков, присущих традиционному выжигу обмотки. Действительно, нагрев статора происходит в водной среде, высокая теплопроводность которой исключает неравномерность нагрева отдельных участков и коробление конструкций. Относительно низкая температура при разложении, отсутствие кислорода воздуха и, как следствие, отсутствие процессов окисления межлистовой изоляции, сохранение свойств электротехнической стали — все это позволяет утверждать, что после ремонта у электрической машины восстановятся все начальные параметры. Проводившиеся в рамках предприятия исследования магнитных свойств активного железа методом намагничивания до и после цикла разложения показали их абсолютную идентичность, т. е. полное отсутствие роста удельных потерь в железе. Кроме того, в результате проверок плотности прессовки железа было отмечено, что в ряде случаев не только не происходит ослабление прессовки, но и наблюдается некоторое уплотнение листов, что можно объяснить проникновением растворимых веществ между ними.

Таким образом, применение метода гидрولитической деструкции при ремонте электрических машин позволяет практически полностью восстановить их исходный ресурс и исходные параметры, сохранить исходные значения потерь и КПД. Это дает возможность эксплуатирующим организациям получать фактический, а не кажущийся экономический эффект от принятия решения в пользу ремонта, а не покупки нового оборудования.

bagrushin@electrorem.ru