

Общеизвестно, что срок службы асинхронных двигателей во многом зависит от температурного состояния изоляции обмотки статора. Даже небольшой перегрев изоляции обмотки выше допустимой температуры приводит к значительному сокращению срока службы двигателя. Одним из возможных путей увеличения срока службы двигателей может быть снижение нагрева обмотки статора обеспечиваемое за счет увеличения теплопроводности самой изоляции [1]. Этого эффекта можно достичь, если на этапе пропитки добавить в пропиточный состав специальные наполнители. Важнейшим свойством, которым должны обладать наполнители изоляции обмоток, применяемые для снижения нагрева электрических машин, является высокая теплопроводность. Кроме того, они должны удовлетворять требованиям к системе изоляции, иметь малую усадку и адгезию к эмали провода, достаточную эластичность и прочность, хорошие технологические показатели, обеспечивающие при изготовлении высокую степень заполнения обмотки [2]. Наибольшее снижение перегрева двигателя достигается за счет увеличения эквивалентного коэффициента теплопроводности обмотки статора $\lambda_{\text{экв}}$, зависящего, в основном, от коэффициента теплопроводности пропиточного состава $\lambda_{\text{п}}$ и коэффициента пропитки $k_{\text{п}}$, который определяется как отношение объема твердых частиц пропиточного состава после сушки обмотки к объему воздуха до пропитки в пазах сердечника статора, где находится обмотка [1]. Применение порошкообразного нитрида алюминия (AlN) в качестве теплопроводящего наполнителя позволяет существенно увеличить коэффициент теплопроводности пропиточного компаунда по сравнению с пропиточными лаками и компаундами, в которых используются другие наполнители [1]. В зависимости от массовой доли нитрида алюминия теплопроводность пропиточного компаунда на основе кремнийорганического лака КО 916К превышает величину 1 Вт/(м·К). Однако известно, что применение теплопроводящих наполнителей приводит к увеличению вязкости пропиточного компаунда, а, при сохранении традиционной технологии пропитки методом наполнения, увеличение вязкости пропиточного компаунда снижает величину коэффициента пропитки, и, соответственно, эффект от применения высокотеплопроводного наполнителя, что требует введения растворителя в компаунд для снижения его вязкости. Это, в конечном счете, приведет к увеличению числа операций пропитки и времени проведения всего процесса. Применение компаундов с нитридом алюминия в качестве наполнителя требует дополнительной процедуры по подготовке компаунда – тщательное размешивание с помощью миксеров. Проведенные исследования показали, что перемешивание компаунда целесообразно проводить в течение всего процесса пропитки. Наилучшим оказался вариант, при котором при проведении пропитки перемешивание осуществлялась с использованием ультразвука. Для реализации предложенного способа ультразвуковой пропитки обмоток электрических машин пропиточными составами на основе

кремнийорганического лака наполненного нитридом алюминия кафедра «Электрические машины» совместно с предприятиями ОАО «Каменск-Уральский электромеханический завод» и ЗАО «РЭЛТЕК» внесли изменения в технологический процесс пропитки обмоток, принятый на ОАО «КУЭМЗ». Процесс пропитки был реализован в научно-исследовательской лаборатории кафедры редких металлов и наноматериалов физико-технологического института УрФУ [3]. Для выполнения экспериментов в ЗАО «Уралэлектромаш» были изготовлены 2 асинхронных двигателя на базе двигателя ДТР80А2. Первый двигатель, заводской номер Х551, был пропитан по технологии 3-х кратной пропитки, принятой на предприятии. Второй двигатель, заводской номер Х552, был передан в НИЛ кафедры редких металлов и наноматериалов физико-технологического института УрФУ для проведения пропитки по новой технологии с использованием пропиточного компаунда с применением высокотеплопроводного наполнителя – нитрида алюминия. Изменения, внесенные в технологический процесс пропитки, заключаются в следующем – после предварительной сушки статор с обмоткой пропитываются в ультразвуковой пропиточной ванне [7, 8]. Процесс пропитки по уровням температур и по времени на каждом этапе был выполнен в соответствии с технологией пропитки серийных двигателей, принятой в ЗАО «Уралэлектромаш». Сама пропитка осуществлялась на стенде ультразвуковым способом в течении 25 минут. На этом этапе в пропиточную ванну с подготовленным компаундом помещался статор двигателя, внутри которого в компаунд вводился ультразвуковая колебательная система, которая перемещалась вверх-вниз в пределах четверти звуковой волны – что соответствовало примерно половине рабочего органа системы. Предварительно перед перемещением рабочего излучателя настраивался режим звукового генератора для согласования с нагрузкой. Ультразвуковой излучатель был специально спроектирован и изготовлен в ЗАО «РЭЛТЭК» под конкретные размеры для пропитки обмотки статора данного двигателя (рис. 1). Рис. 1 – Ультразвуковой излучатель

После пропитки были проведены контрольные испытания. Испытания на проверку электрической прочности витковой и корпусной изоляции, проведенные по стандартной методике, выдержали все опытные образцы асинхронных двигателей. Выдержки из заводских протоколов испытаний сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний двигателей ДТР80А2

Показатель	Серийный двигатель	Двигатель с однократной пропиткой с нитридом алюминия
Ток номинального режима, А	3,502	3,502
Расчетный перегрев обмотки, °С	48	44
КПД, %	76,1	76,3

Испытания показали положительную тенденцию на увеличение КПД и снижение температуры обмотки статора даже при однократной пропитке. При многократной (трехкратной) пропитке с применением ультразвука и использованием нитрида алюминия в качестве теплопроводящего наполнителя пропиточных компаундов ожидается подтверждение прогноза на увеличение

КПД и срока службы серийных асинхронных двигателей. Результаты исследований тепло- и электрических свойств композиционных материалов на основе нитрида алюминия и эпоксидных компаундов, показывают, что данные материалы имеют значение коэффициента теплопроводности (λ), в 8-10 раз превосходящие образцы обычной изоляции без наполнителей, а также превышающие значение этого коэффициента для композиционных материалов на основе минеральных наполнителей, таких как кварцевый песок, маршалит, нитрид бора, имеющие в пределах $\lambda = 0,91-1,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Рис. 2- Зависимость превышения температуры лобовой части обмотки статора со стороны привода двигателей серии 4А от коэффициента пропитки (k_p) и коэффициента теплопроводности пропиточного состава (λ_p), $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ Как видно из рисунка 2, можно спрогнозировать снижение температурного перегрева обмотки статора двигателей при увеличении коэффициента пропитки. Для опытного двигателя с высотой оси вращения 80 мм снижение температуры лобовой части обмотки статора со стороны привода составит не менее $9\div 10 \%$. В абсолютных величинах снижение температуры лобовой части будет равно $10\div 12 \text{ К}$ для нагревостойкости изоляции класса Н (до 180°C). Для прогнозируемых значений $\lambda = (1,5-2,5) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $k_p = 0,6$ можно ожидать, что снижение перегрева обмотки статора составит не менее 15 К [6]. В закрытых обдуваемых электродвигателях общего назначения длина лобовых частей в зависимости от мощности составляет 60-70 % длины всей обмотки для машин с частотой вращения 3000 об/мин. Таким образом, как правило, более половины (до 70%) электрических потерь в обмотке статора выделяется в лобовых частях. Однако у двигателей с высотой оси вращения $h=56\div 250 \text{ мм}$ лишь 4-10 % потерь обмотки статора передаётся от лобовых частей к станине через внутренний воздух. Основная часть тепла, выделяемая в лобовых частях обмотки, отводится через пазовую часть в сердечник (60% у машин на 3000 об/мин и 80% – на 750 об/мин) [4, 5]. Для повышения интенсивности теплоотдачи от лобовых частей обмотки статора к корпусу двигателя возможно использование заполнения пространства между лобовыми частями и корпусом теплопроводящим составом с большим коэффициентом теплопроводности. Заполнение (капсулирование) полости лобовых частей высокотеплопроводным компаундом увеличивает теплоотвод от лобовых частей к станине, тем самым снижается отток теплоты в пазовую часть и уменьшается нагрев обмотки, следовательно, уменьшаются потери и увеличиваются срок службы изоляции и надежность двигателя [6]. Как показали результаты испытаний, применение однократной пропитки компаундом с наполнителем из нитрида алюминия приводит к снижению перегрева обмотки статора в номинальном режиме работы двигателя более чем на 8%. В результате КПД возрастает на 0,2 % по сравнению с КПД серийного двигателя, изготовленного с трехкратной пропиткой обмотки статора. Таким образом, технология пропитки состоит из двух этапов. На первом этапе капсулирования

осуществляется пропитка обмотки статора высокотеплопроводным составом на основе пропиточного лака и теплопроводящего наполнителя (AlN). На втором этапе лобовые части заключаются в капсулы из более теплопроводного заливочного состава. Для обеспечения высокого эквивалентного коэффициента теплопроводности капсулы в пределах $\lambda_{\text{экв}} = 2,5 \div 7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ в компаунд добавляется наполнитель в виде металлических гранул (алюминия) диаметром 2–6 мм и тонкодисперсный порошок алюминия. Основные требования к заливочному составу: высокая теплопроводность, прочность, эластичность, температурный коэффициент линейного расширения, близкий к температурному коэффициенту линейного расширения стали, меди или алюминия. Эти требования удовлетворяются при введении больших количеств наполнителей и пластификаторов, что сильно снижает электроизоляционные свойства. Однако большое электрическое сопротивление и пробивное напряжение здесь не требуется, так как капсула контактирует с обмоткой через слой наполнителя на основе пропиточного компаунда с высокими изоляционными свойствами. Подробное описание технологии пропитки и изготовления капсул приведено в [4]. В ходе исследований была изготовлена опытная партия асинхронных двигателей из трех машин с новой изоляцией на основе композиционного материала «нитридалюминия – кремнийорганический лак КО-916К» и капсулированными лобовыми частями с повышенным КПД и увеличенным сроком службы. Для проверки результатов исследований было испытано два опытных образца двигателя ДТР80А2 мощностью $P_2 = 1,5 \text{ кВт}$ и скоростью вращения при номинальной нагрузке $n_n = 2715 \text{ об/мин}$ с новой изоляцией и один серийный двигатель с изоляцией, выполненной по классической технологии. Испытания проводились для 4 исполнений двигателей: 1) серийный - заводской номер Х551, статор которого был трижды пропитан по принятой на ЗАО «Уралэлектромаш» технологии для изоляции асинхронных двигателей класса нагревостойкости Н; 2) двигатель, статор которого был однократно пропитан лаком КО-916К с нитридом алюминия – заводской номер Х550; 3) двигатель, статор которого был однократно пропитан лаком КО-916К с нитридом алюминия с заполнением полости лобовых частей обмотки статора высокотеплопроводным компаундом – заводской номер Х550; 4) двигатель, в котором клинья в пазовой части статора были вынуты, а лобовые части стягивались только шнуром, статор которого был однократно пропитан лаком КО-916К с нитридом алюминия с заполнением полости лобовых частей обмотки статора высокотеплопроводным компаундом – заводской номер Х549. При проведении испытаний асинхронных двигателей приняты меры по обеспечению одинаковых условий экспериментов. Все двигатели с разными модификациями статоров испытывались с одним и тем же ротором при одинаковой температуре охлаждающего воздуха. Каждый из циклов испытаний проводился на одном и том же испытательном стенде при использовании одинаковых приборов по стандартной программе испытаний,

выполненной одной и той же группой испытателей. По экспериментальным данным выполненных испытаний был проведен расчет рабочих характеристик двигателей. При расчете рабочих характеристик двигателей с новой изоляцией на основе композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» расчетная температура обмотки статора принималась меньшей на величину, равную уменьшению перегрева двигателя с новой изоляцией по отношению к серийной машине. При этом осуществлялось выравнивание постоянных потерь двигателей для более строгого выявления влияния температуры на КПД сравниваемых двигателей (в этом отношении двигатели были поставлены в одинаковые условия). По результатам испытаний на рисунках 3 и 4 построены графики рабочих характеристик испытанных машин. Рис. 3 – Зависимость КПД серийного (1) и опытных (2 - 4) асинхронных двигателей. Рис. 4 – Зависимость электрических потерь в обмотке ротора серийного (1) и опытных (2 - 4) асинхронных двигателей. Под №1 изображены характеристики серийной машины, под №2 – характеристики двигателя (заводской номер Х550) до капсулирования, под №3 и №4 – характеристики двигателя (заводской номер Х550) после капсулирования. Как показали испытания, выполненные в ЗАО «Уралэлектромаш», перегрев обмотки статора двигателей, пропитанных компаундами с теплопроводящими наполнителями на основе композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К», снизился на 40 К. Такое снижение нагрева обмотки дало увеличение КПД двигателя на 0,6 %, величина которого была определена работниками испытательной станции ЗАО «Уралэлектромаш» по экспериментальным характеристикам нагрузочного режима по методу разделения потерь. Оценка влияния капсулирования лобовых частей компаундами с теплопроводящими наполнителями проведена в УрФУ в НИЛЭлектромеханики кафедры электрических машин по результатам сравнительных тепловых испытаний трёх двигателей. Капсулирование было выполнено на двух двигателях, которые предварительно были пропитаны компаундами с нитридом алюминия. Для каждого двигателя были проведены тепловые испытания в номинальном режиме до капсулирования и после него. В результате капсулирования перегрев обмотки статора в двигателе, ранее испытанном в ЗАО «Уралэлектромаш», имеющим клинья и лобовые части которого изолировались стеклотканью, снизился на 8,2 К. Перегрев второго двигателя, в котором клинья в пазовой части статора были вынуты, а лобовые части стягивались только шнуром, снизился в большей степени и составил 11,8 К. Результирующее снижение нагрева обмотки статора по сравнению с серийной машиной, пропитанной по стандартной технологии без капсулирования лобовых частей, составило для первого двигателя 12,2 К и 15,8 К для второго двигателя. В результате КПД этих машин увеличился соответственно на 1,0% и 1,15%. Таким образом, применение ультразвуковой пропитки всыпных обмоток статоров

асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт компаундом, полученным на основе нитрида алюминия, обладающего хорошими электроизоляционными свойствами и высоким коэффициентом теплопроводности, с одновременным капсулированием лобовых частей, улучшает служебные характеристики асинхронных двигателей. При прогнозируемом снижении температуры обмотки статора на 15 К сопротивление обмотки статора и, следовательно, электрические потери в статоре снижаются на 4,3 % и 5 % соответственно. При этом снижение нагрева ротора и, соответственно, активного сопротивления обмотки ротора в приближенной оценке соответственно составит 7,5 оС и 2,6 %. Общее снижение электрических потерь для асинхронного двигателя составляет 31 Вт. Суммарные потери асинхронного двигателя уменьшаются с 933 Вт до 901 Вт и КПД возрастает до значения 86 %. В результате КПД будет выше паспортного значения КПД 85,5 % на 0,5 %. Снижение температуры нагрева изоляции обмотки без снижения класса нагревостойкости и изменения электрической и магнитной нагрузки асинхронного двигателя повышает надежность, как самой обмотки, так и асинхронного двигателя в целом. Надежность повышается за счет увеличения стойкости к кратковременным и пусковым перегрузкам, а также уменьшения температурного старения изоляции. В соответствии с правилом Монтзингера, часто применяемым при оценке срока службы изоляции, снижение нагрева на 12 градусов приводит к увеличению срока службы изоляции класса нагревостойкости F и H в 2 раза. При снижении на 15 градусов – в 2,38 раза. Соответственно, сокращается необходимость ежегодной замены асинхронных двигателей, выводимых в капитальный ремонт из-за повреждения изоляции обмотки, с 18 % до 7,6 %, т.е. на 10,4 %.