

В настоящее время расчетный срок службы асинхронных электродвигателей средней и малой мощности (до 100 кВт) производимых на предприятиях РФ составляет от 3 до 5 лет [1], что значительно меньше, чем у электродвигателей большой мощности (30 – 40 лет) [2]. Основной причиной выхода из строя асинхронных электродвигателей является пробой электрической изоляции статора по причине ее перегрева и механического разрушения [3, 4]. Снизить рабочую температуру электродвигателя можно интенсификацией теплообмена между обмотками статора и корпусом электродвигателя за счет применения электроизоляционных материалов с увеличенным коэффициентом теплопроводности для заполнения межвиткового пространства обмоток статора электродвигателя. В работе [5] предлагается использовать для пропитки статоров асинхронных электродвигателей композиционный материал «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К». Кроме того там отмечается, что этот композиционный материал может быть применен в существующей технологии производства электродвигателей без внесения в нее значительных изменений. Для того чтобы предложить технологическую схему пропитки статоров асинхронных электродвигателей композиционным материалом «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» необходимо определить оптимальные параметры основных технологических операций, основанные на всестороннем исследовании физико-химических свойств композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К». Так как теплопроводность изоляции статора полностью определяет тепловой режим работы электродвигателя, то основным параметром, на который следует обратить внимание при рассмотрении возможности применения нового композиционного материала, является коэффициент теплопроводности. В работе [6] методом лазерной вспышки измерены коэффициенты теплопроводности образцов из газофазного AlN, изготовленных методом горячего прессования с добавкой оксида иттрия, образцов чистого кремнийорганического лака КО-916К и образцов композитов «AlN – кремнийорганический лак КО-916К». Значение коэффициента теплопроводности для нитрида алюминия, полученного газофазным способом, составило 99,9 Вт/(м•К), а для чистого лака КО-916К – 0,17 Вт/(м•К). Измерение теплопроводности композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» проводили при содержании наполнителя от 0 до 55 об.% в температурном диапазоне от 50 до 200°С. Результаты представлены на рисунке 1. Полученные значения теплопроводности образцов показали, что введением нитрида алюминия в кремнийорганический лак можно добиться увеличения коэффициента теплопроводности в 4,5 раза по сравнению с исходным материалом. Этот результат позволяет говорить о перспективности применения композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» в качестве пропиточного состава для

обмоток статора асинхронных электродвигателей. Рис. 1 – зависимость коэффициента теплопроводности композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» от температуры и содержания наполнителя. Для прогнозирования коэффициента теплопроводности композиционного пропиточного состава в работах [7, 8] рассмотрены 11 современных моделей, описывающих теплопроводность наполненных полимеров в зависимости от объемного содержания наполнителя, сделана оценка их применимости для композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» и проведены расчеты коэффициента теплопроводности [9, 10, 11]. Для описания экспериментальных данных по теплопроводности композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» больше других подходит модель, предложенная В.И. Оделевским [12]: (1) где λ_i – коэффициент теплопроводности; C_i – объемная концентрация. Модель В.И. Оделевского основана на том представлении, что частицы модификатора в материале изолированы друг от друга слоем матрицы и не соприкасаются между собой. На рисунке 2 приведена фотография композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» сделанная с помощью оптического микроскопа. Расчеты по моделям, предусматривающим взаимодействие компонентов системы, суммирование свойств проводимости (обобщенной проводимости), взаимопроникновение компонентов и перколяции в системе дают завышенные значения коэффициентов теплопроводности. Для оценки применимости нового композита в качестве электроизоляционного материала и определения влияния нитрида алюминия на диэлектрические характеристики связующего (лака КО-916К) в работе [13] проведено определение электрофизических свойств композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К». Результаты измерения удельного объемного сопротивления и напряжения пробоя приведены в таблице 1. Рис. 2 – Фотография отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»

Таблица 1 – Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v и напряжения пробоя композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»

Содержание AlN (об.%)	Удельное объемное сопротивление, (Ом•м)	Напряжение пробоя, (кВ/мм)
0 (чистый лак)	$3,0 \cdot 10^{13}$	75
10	$3,3 \cdot 10^{13}$	102
30	$3,4 \cdot 10^{13}$	109

Приведенные в таблице 1 результаты согласуются с опубликованными данными [5, 13] о том, что введение неорганических модификаторов повышает электрофизические свойства пропиточных электроизоляционных лаков. Так же в работе [14] отмечено, что пробой образцов происходил по объему материала, без консолидации в местах расположения частиц неорганического модификатора. Для определения оптимальной степени содержания наполнителя (AlN) в композиционном материале можно воспользоваться результатами, полученными в работе [15], где изучалась вязкость электроизоляционного лака КО-916К с

различным содержанием нитрида алюминия. Чтобы оценить влияние температуры и содержания наполнителя (AlN) на вязкость кремнийорганического лака КО-916К авторами были проведены измерения вязкости для составов с содержанием наполнителя от 0 до 50 об.% в интервале температур от 20 до 80°C. Результаты измерений представлены на рисунке 3. Из приведенных данных (рис. 3) видно, что увеличением температуры до значений, при которых не начинаются процессы отверждения (80°C), можно добиться многократного снижения вязкости исходного лака. В свою очередь, добавление нитрида алюминия увеличивает значение вязкости, причем полученная зависимость нелинейная. Представленные результаты свидетельствуют о том, что вязкость кремнийорганического лака КО-916К наполненного нитридом алюминия закономерно изменяется с увеличением содержания наполнителя и температурой измерений: с ростом содержания нитрида алюминия вязкость увеличивается, а с ростом температуры – уменьшается. Характерно, что при содержании нитрида алюминия менее 20 об.% изменение вязкости незначительно, а при дальнейшем увеличении содержания нитрида алюминия происходит резкое увеличение вязкости кремнийорганического лака КО-916К наполненного нитридом алюминия. Рис. 3 – зависимость коэффициента вязкости композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» от температуры и содержания наполнителя. При синтезе нитрида алюминия газофазным способом получается порошок с размерами частиц 50 – 200 нм [3], но в процессе хранения эти частицы агломерируются в агломераты со средним размером 8 мкм [3]. Уменьшение размера частиц, как об этом свидетельствуют опубликованные данные [16], повышает устойчивость дисперсных систем и поэтому целесообразно проводить процесс измельчения порошка в планетарных мельницах. Но с экономической точки зрения введение такой операции в технологический процесс для получения кремнийорганического лака КО-916К наполненного нитридом алюминия вряд ли целесообразно. Существуют менее затратные способы, с помощью которых можно стабилизировать дисперсную систему в течение времени, необходимого для практического её использования. В качестве таких методов можно рекомендовать как ультразвуковую обработку, так и интенсивное механическое перемешивание [17-19]. В настоящей работе предлагается технологическая схема пропитки обмоток статора асинхронного электродвигателя пропиточным составом на основе кремнийорганического лака КО-916К наполненного нитридом алюминия (рисунок 5), основанная на стандартной технологии, существующей в промышленности (ЗАО «Уралэлектромаш», г. Каменск-Уральский) для проведения процесса пропитки статоров асинхронных электрических двигателей малой и средней мощности (рисунок 4). Основной особенностью предлагаемой технологической схемы является то, что в качестве пропиточного состава обмоток статора используется кремнийорганический лак

КО-916К наполненный нитридом алюминия. После проведения операции пропитки, в процессе сушки из пропиточного состава улетучивается растворитель и в межвитковом пространстве происходит термическое отверждение электроизоляционного композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак-КО916К». Для равномерного распределения агломератов частиц модификатора (AIN) в кремнийорганическом лаке КО-916К необходимо дополнительное воздействие, поэтому введение модификатора осуществляется в стандартный растворитель ксилол, при воздействии ультразвуковых колебаний (УЗК). После обработки ультразвуком дисперсионная среда сохраняет седиментационную устойчивость в течение времени достаточного для последующего введения растворителя с частицами AIN в кремнийорганический лак КО-916К. Вводить растворитель, с равномерно распределенным по объему модификатором, в кремнийорганический лак КО-916К наиболее целесообразно с помощью интенсивного механического перемешивания. При оценке возможности использования ультразвуковой обработки на данной стадии необходимо учитывать два противоборствующих фактора: с одной стороны применение интенсивных ультразвуковых колебаний позволяет более эффективно проводить деструкцию агрегатированных частиц и равномерно распределять частицы в объеме композита, что положительно сказывается на свойствах конечного композиционного материала. С другой стороны ультразвук оказывает существенное влияние на структуру кремнийорганического лака, вызывая даже деструкцию определенных связей полимера [17] и нагревает пропиточный состав, что может вызвать нежелательное преждевременное отверждение. В свою очередь, проведение операции пропитки статора асинхронного электродвигателя при воздействии ультразвуком оказывает положительное влияние на процесс, вследствие того, что принцип действия узла акустической пропитки основан на изменении свойств жидкой среды при возбуждении в ней ультразвуковых колебаний высокой интенсивности с помощью специального ультразвукового излучателя, приведенного в соприкосновение со средой. При этом в прилегающем к рабочей поверхности излучателя слое пропиточного состава возникает акустическая кавитация, ультразвуковые течения и звукокапиллярный эффект, благодаря которым увеличивается текучесть состава, и его проникающая способность, а, следовательно, повышается эффективность и качество пропитки. На основании этого в предложенной технологической схеме трехкратная пропитка обмоток статора по существующей технологии заменена однократной операцией пропитки с применением ультразвуковых колебаний, что помимо вышеизложенных преимуществ дополнительно позволяет сократить время обработки статора на 20 часов. Время проведения отдельной операции пропитки и температурный режим сушки статора (отверждения композита) можно оставить неизменными, как и в существующей технологии. Рис. 4 –

Технологическая схема пропитки обмотки статора асинхронного электродвигателя, применяемая на ЗАО Уралэлектромаш, г. Каменск-Уральский

Рис. 5 - Технологическая схема пропитки асинхронного электродвигателя пропиточным составом из кремнийорганического лака КО-916К наполненного нитридом алюминия

Для экспериментального подтверждения предложенной технологической схемы (рисунок 5) были проведены лабораторные и промышленные испытания четырех электродвигателей ДТР80А2. Номинальные данные электродвигателей: - полезная мощность $P = 1,5$ кВт; - схема соединения обмотки статора Y; - номинальное линейное напряжение $U_n = 380$ В; - ток номинального режима $I_n = 3,5$ А; - скорость вращения при номинальной нагрузке $n_n = 2715$ об/мин; - коэффициент мощности $\cos\varphi_n = 0,89$; - коэффициент полезного действия $\eta = 73,0\%$. Статор одного из двигателей был трижды пропитан по технологии принятой на ЗАО «Уралэлектромаш» для изоляции асинхронных двигателей класса нагревостойкости Н.У трех оставшихся электродвигателей, статоры были однократно пропитаны лаком КО-916К наполненным нитридом алюминия (AlN) с применением УЗК. Все опытные образцы электродвигателей успешно прошли испытания на проверку электрической прочности витковой и корпусной изоляции, проведенные по стандартной методике. При проведении всех испытаний асинхронных электродвигателей с новой пазовой изоляцией принимались меры по обеспечению одинаковых условий экспериментов. Все двигатели с разными модификациями статоров испытывались с одним и тем же ротором при одинаковой температуре окружающей среды. Каждый из циклов испытаний проводился на одном и том же испытательном стенде при использовании одинаковых приборов по стандартной программе испытаний и выполнялся одной группой испытателей. Согласно стандартной методике тепловых испытаний двигатель в течение 20 минут нес нагрузку равную 130% от номинальной. Затем в течение двух часов работал при номинальной нагрузке. Перегрев обмотки статора определялся по методу сопротивления. В соответствии с этим методом сначала измерялось сопротивление обмотки при температуре равной температуре окружающей среды, а затем при температуре установившегося теплового режима электродвигателя. При этом были выравнены постоянные потери двигателей для более строгого выявления влияния температуры на КПД (в этом отношении двигатели были поставлены в равные условия). На первом этапе эксперимента проводился расчет рабочих характеристик электродвигателя со статором, изготовленным по технологии принятой на ЗАО «Уралэлектромаш» (серийного электродвигателя) и электродвигателей, обмотки статоров которых подверглись однократной ультразвуковой пропитке кремнийорганическим лаком КО-916К наполненным нитридом алюминия. Этот расчет показал, что перегрев обмоток статоров электродвигателей с пазовой изоляцией из композиционного материала «нитрид алюминия-

кремнийорганический лак КО-916К» снизился более чем на 8% (4°C) по сравнению с серийным электродвигателем. Такое снижение нагрева обмотки дает увеличение коэффициента полезного действия (КПД) электродвигателя на 0,6%, величина которого была найдена работниками испытательной станции ЗАО «Уралэлектромаш» по экспериментальным характеристикам нагрузочного режима по методу разделения потерь. Таким образом, испытания показали положительную тенденцию на увеличение КПД и снижение температуры обмоток статора при однократной ультразвуковой пропитке. Далее проводилась оценка влияния капсулирования лобовых частей компаундами с теплопроводящими наполнителями. Работа проводилась в УрФУ в НИЛ Электромеханики кафедры электрических машин по результатам сравнительных тепловых испытаний трёх двигателей, с пазовой изоляцией из композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К». Из трех двигателей капсулирование было выполнено на двух, притом на одном клинья и лобовые части изолировались стеклотканью, а у второго электродвигателя клинья в пазовой части статора были вынуты, а лобовые части стягивались только шнуром. Для каждого электродвигателя были проведены тепловые испытания в номинальном режиме до капсулирования и после него. В результате капсулирования перегрев обмотки статора в первом электродвигателе, клинья и лобовые части которого изолировались стеклотканью, снизился на 8,2°C. Перегрев второго электродвигателя, в котором клинья в пазовой части статора были вынуты, а лобовые части стягивались только шнуром, снизился в большей степени и составил 11,8°C. Результирующее снижение нагрева обмоток статора по сравнению с серийной машиной, пропитанной по стандартной технологии без капсулирования лобовых частей, составило для первого электродвигателя 12,2°C и 15,8°C для второго двигателя. В результате КПД этих машин увеличился соответственно на 1,0% и 1,15%. Выводы 1. Проведение ультразвуковой пропитки статоров асинхронных электродвигателей пропиточным составом на основе кремнийорганического лака КО-916К наполненного нитридом алюминия (AlN) позволят сократить количество операций пропитки статора в 3 раза по сравнению с существующей на ЗАО «Уралэлектромаш» технологией и, соответственно, уменьшить время обработки статора более чем на 20 часов. 2. Использование композиционного материала «нитрид алюминия – кремнийорганический лак КО-916К» в качестве пазовой изоляции статора асинхронного электродвигателя позволяет добиться снижения нагрева обмоток статора по сравнению с серийной машиной, пропитанной по стандартной технологии без капсулирования лобовых частей от 4°C до 15,8°C и увеличения коэффициента полезного действия на 0,6 – 1,15%.