

УДК 621.315.6(088.8)

## МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПИТКИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

**Смирнов Геннадий Васильевич,**

д-р техн. наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.  
E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Хасанов Олег Леонидович,**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой наноматериалов и нанотехнологий, директор Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: khasanov@tpu.ru

**Смирнов Дмитрий Геннадьевич,**

канд. техн. наук, старший науч. сотрудник. Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.  
E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Полисадова Валентина Валентиновна,**

канд. техн. наук, инженер-исследователь кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
E-mail: polis@tpu.ru

**Петюкевич Мария Станиславовна,**

аспирант, ассистент кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: petukevich@tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью улучшения технологии пропитки электрических обмоток, повышения их качества и надежности.

**Цель работы.** Обоснование выбора магнитоэлектрического пропиточного состава и перспективности его применения для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических изделий.

**Методы исследования.** Электротепловые – для определения теплопроводности и теплоемкости; электромагнитные – для определения зависимости магнитной проницаемости состава от концентрации феррита; вискозиметры – для определения вязкости композиций пропиточных составов; ёмкостные – для контроля степени насыщенности межвитковых полостей обмотки пропиточным составом; высоковольтные – для исследования электрической прочности магнитоэлектрических композиционных составов.

**Результаты.** Установлено, что применение магнитоэлектрического состава для пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических намоточных изделий способствует: во-первых, устранению всех энергоёмких, шумящих электромеханических устройств; во-вторых, обеспечению более равномерного полива лобовых частей; в-третьих, существенному повышению коэффициента пропитки обмоток, характеризующего степень насыщенности межвитковых полостей пропиточным составом. Это достигается за счет того, что по завершении пропитки в обмотку подается греющий ток, магнитное поле которого служит своеобразным затвором, с его помощью пропиточный состав прекращает вытекать из полостей обмотки при их сушке. Высокая теплопроводность предлагаемой смеси и высокие коэффициенты пропитки позволяют снизить перегрев обмоток при их эксплуатации, что в несколько раз повышает их эксплуатационную надежность и долговечность. Показано, что введение в компаунд КП-34 никель-цинковых магнитомягких частиц позволяет повысить теплопроводность пропиточной смеси более чем в полтора раза. При этом технологические свойства магнитоэлектрической смеси (вязкость, электрическая прочность и др.) остаются в допустимых пределах. Более высокая теплопроводность рассматриваемой магнитоэлектрической смеси, по сравнению с теплопроводностью компаунда КП-34, традиционно используемого для струйно-капельной пропитки статорных обмоток, а также высокие коэффициенты пропитки при использовании магнитоэлектрического состава дают возможность снизить перегрев обмоток статоров не менее чем на 30 %.

**Ключевые слова:**

Магнитоэлектрический компаунд, ток, пропиточный компаунд, пропитка, теплопроводность, вязкость, магнитное поле.

## Введение

К намоточным изделиям электротехнической и радиотехнической промышленности относятся электрические машины, трансформаторы, дроссели, сельсины, катушки индуктивности, фильтры, преобразователи и др.

Среди перечисленных намоточных изделий наиболее распространенным видом являются электрические машины. Этот вид продукции используется практически во всех сферах деятельности и быта человека. Факт широчайшего распространения данного вида изделий наглядно подтверждают цифры, показывающие потребление ими электрической энергии. Подсчитано, что только на долю асинхронных электродвигателей общепромышленного применения в Российской Федерации приходится 50 % всей вырабатываемой электроэнергии, а в США – 64 %. Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция обмоток электрических машин. По современным данным, на долю обмоток асинхронных электродвигателей приходится 95–98 % от общего количества отказов, причем на межвитковую изоляцию приходится 93 %, на межфазную – 5 % и на корпусную – 2 % всех отказов обмоток [1]. При этом убытки обусловлены не только большими затратами на ремонт или замену отказавших электродвигателей, составляющими около 80 % стоимости годового выпуска электрических машин, но и от простоя оборудования, в котором была задействована отказавшая электрическая машина [2]. Низкая надежность изоляции обмоток электрических машин во многом зависит от качества изоляции намоточного провода, от намоточного оборудования и технологии пропитки. Именно в процессе пропитки обмоток пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции. В результате повышаются не только электроизоляционные свойства обмоток, но и их теплопроводность, влагостойкость, монолитность и другие характеристики, обеспечивающие надежность изоляции обмоток.

Все эти качественные изменения свойств обмотки после пропитки связаны с физическими свойствами самого пропиточного состава, а также с количеством этого состава, проникшего в полости обмотки и оставшегося в них после операции компаундирования (сушки). Поэтому вопрос о совершенствовании пропиточных составов и технологии пропитки обмоток весьма актуален.

## Расчетная часть

Надежность и долговечность обмоток электротехнических и радиотехнических намоточных изделий зависит от многих факторов, одним из которых является уровень рабочей температуры обмоток в процессе их эксплуатации. Величина перегрева обмоток в процессе эксплуатации намоточных изделий определяется рядом технологических факторов, в частности от эквивалентной теплопроводности обмотки и её теплового сопротивления на

границе обмотка – магнитный сердечник. Значение этих показателей, в свою очередь, зависит от теплопроводности пропиточного состава и степени заполнения этим составом межвитковых и корпусных полостей обмотки. При этом, чем выше теплопроводность пропиточного состава и больше степень заполнения им межвитковых и корпусных полостей обмотки, тем лучше осуществляется из неё теплоотвод в магнитный сердечник и в окружающую среду, тем ниже рабочая температура обмотки и выше срок её службы.

Во всех известных технологиях пропитки намоточных изделий используются лаки и компаунды, которые обладают относительно малой теплопроводностью. Поэтому чаще всего для более существенного повышения указанного параметра используют модификацию лаков и компаундов при помощи разных наполнителей [3].

При использовании компаундов с наполнителями, например кварцем или нитридом бора, теплопроводность электрической смеси возрастает, однако это приводит, как правило, к значительному ухудшению качества пропитки и снижению производительности труда [3].

Для того чтобы повысить теплопроводность обмотки электротехнического изделия и добиться высоких коэффициентов пропитки с сохранением электрической прочности витковой и корпусной изоляции, к пропиточному составу с наполнителями должны быть предъявлены следующие требования:

- в состав композитной смеси, кроме связующего компаунда, должен входить порошок наполнителей, позволяющий заметно повысить теплопроводность смеси по сравнению с теплопроводностью лака;
- смесь, для улучшения качества пропитки, должна взаимодействовать с магнитным полем обмотки пропитываемого изделия, которое создается во время его разогрева электрическим током. Поскольку все пропиточные лаки обладают магнитной проницаемостью  $\mu=1$ , необходимое взаимодействие должно создаваться за счет магнитных свойств порошка наполнителя;
- для получения максимальной теплопроводности состава допускается вводить в него дополнительно порошок металла в количествах, не приводящих к снижению электрической прочности ниже допустимого значения;
- для улучшения тепловой совместимости обмотки с другими элементами изделия необходимо, чтобы поверхность пропиточного изделия обладала достаточной отражающей способностью.

С учетом предъявленных требований был предложен состав пропиточной смеси, в которую входит пропиточный терморреактивный компаунд КП-34, мелкодисперсный порошок магнитомягкого феррита М400НН и пудра алюминия АЛ-9 [4–7].

Работы [4–7] стимулировали разработку магнитодиэлектрических составов и их применение в иных перспективных областях деятельности чело-

века. Авторы работы [8] предположили, что магнитоэлектрические составы на основе никель-цинковых порошков могут найти широкое применение в устройствах, использующих или создающих сопутствующее электромагнитное излучение сверхвысокочастотного диапазона для решения возникающих в связи с этим проблем, таких как экологическая защита биологических объектов от его вредного воздействия, подавление помех средствам связи, обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, предотвращение утечек информации по радиоканалу и т. п. Отдельный интерес представляет разработка технологии снижения заметности «стелс», предназначенной для маскировки средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами противника.

Подробная информация об исследованиях композитных составов на основе никель-цинковых ферромагнитных частиц изложена в работах [9–16].

Применение порошка никель-цинкового феррита в пропиточных составах придает им магнитные свойства и повышает теплопроводность, а присутствие алюминиевой пудры обеспечивает снижение степени черноты поверхности пропиточного элемента и дополнительно приводит к повышению теплопроводности состава. В то же время улучшается теплопроводность смеси, поскольку коэффициент теплопроводности у феррита в двадцать раз, а у алюминия на три порядка выше, чем у пропиточного компаунда.

Оценим эквивалентную теплопроводность намоточного изделия на примере индуктивного элемента (ИЭ). Подробные методики исследования магнитоэлектрических составов известны и подробно описаны в работах [17, 18]. Об эффективности использования магнитоэлектрических составов для силовых кабелей отмечено в работах [19–21]. Авторы показали эффективность при использовании указанных составов на кабелях, где второй экран выполнен из электропроводящей сшитой полимерной композиции, магнитоэлектрический экран в виде полимерной ленты с ферромагнитным мелкодисперсным наполнителем (размер частиц от 0,2 до 50 мкм), наложенной методом обмотки.

Определяющим параметром пропитки, как это было отмечено выше, является снижение перегрева ИЭ в рабочем режиме. Поэтому необходимо добиться не только наиболее полного заполнения пустот обмотки пропиточным составом, но и также, чтобы этот состав обладал максимальной теплопроводностью.

Очевидно, изменение температуры перегрева внутренних слоев ИЭ будет пропорционально изменению теплового потока от внутренних слоев к внешним.

Удельный тепловой поток через обмотку будет определяться следующим выражением:

$$q = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}(T_{\text{в1}} - T_{\text{в2}})}{d_{\text{СТ}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{в1}}$ ,  $T_{\text{в2}}$  – температуры внешних поверхностей стенки,  $T_{\text{в1}} > T_{\text{в2}}$ ;  $d_{\text{СТ}}$  – толщина стенки;  $\lambda_{\text{ЭКВ}}$  – теплопроводность стенки, в нашем случае обмотки ИЭ.

Изменения теплового потока через обмотку после пропитки определяется как

$$\Delta q = q_2 - q_1, \quad (2)$$

где  $q_1$  – тепловой поток через непропитанную обмотку;  $q_2$  – тепловой поток через пропитанную обмотку.

$$\Delta q = \frac{(\lambda_{\text{ЭКВ1}} - \lambda_{\text{ЭКВ2}})(T_{\text{в1}} - T_{\text{в2}})}{d_{\text{СТ}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{ЭКВ1}}$ ,  $\lambda_{\text{ЭКВ2}}$  – эквивалентные теплопроводности обмотки до и после пропитки.

Определим относительное изменение теплового потока:

$$q_{\text{отн}} = \frac{\Delta q}{q_1}. \quad (4)$$

Подставляя (1) и (3) в (4), получим:

$$\delta q_{\text{отн}} = \frac{(\lambda_{\text{ЭКВ2}} - \lambda_{\text{ЭКВ1}})}{\lambda_{\text{ЭКВ1}}}. \quad (5)$$

Эквивалентную теплопроводность обмотки определим по формуле

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda_{\text{н}}^{\circ} \left\{ \left[ \arcsin \frac{-0,82 + 0,89(d/d_{\text{н}})\sqrt{k_3}}{0,95 - 0,77(d/d_{\text{н}})k_3} + 1,57 \right] \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1 - 0,86(d/d_{\text{н}})^2 k_3}} - 0,9 \right\}, \quad (6)$$

где  $d$ ,  $d_{\text{н}}$  – диаметры голого и изолированного провода;  $k_3$  – коэффициент заполнения «по квадратам»;  $\lambda_{\text{н}}^{\circ}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности промежутков между жилами:

$$\lambda_{\text{н}}^{\circ} = \frac{\delta_{\text{н}} + \delta_{\text{в}}}{\delta_{\text{н}}/\lambda_{\text{н}} + \delta_{\text{в}}/\lambda_{\text{вЭКВ}}}, \quad (7)$$

где  $\delta_{\text{н}}$  – двусторонняя толщина изоляции провода;  $\delta_{\text{в}}$  – толщина воздушных промежутков между проводами для шахматной укладки:

$$\delta_{\text{в}} = 0,5d_{\text{н}} [1 - 0,5\sqrt{4 - (d/d_{\text{н}})^2}], \quad (8)$$

где  $\lambda_{\text{н}}$ ,  $\lambda_{\text{вЭКВ}}$  – коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев.

$$\lambda_{\text{вЭКВ}} = \frac{2\lambda_{\text{в}}\lambda_{\text{н}}[\lambda_{\text{н}}k_{\text{н}} + \lambda_{\text{в}}(1 - k_{\text{н}})]}{\lambda_{\text{в}}\lambda_{\text{н}} + \left[ \frac{[\lambda_{\text{н}}k_{\text{н}} + \lambda_{\text{в}}(1 - k_{\text{н}})] \times}{\times [\lambda_{\text{в}}k_{\text{н}} + \lambda_{\text{н}}(1 - k_{\text{н}})]} \right]}, \quad (9)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\lambda_{\text{н}}$  – коэффициенты теплопроводности воздуха и пропиточного состава;  $k_{\text{н}}$  – коэффициент пропитки.

Коэффициент теплопроводности пропиточного состава  $\lambda_{\text{н}}$  определяется следующим выражением [22]:

$$\lambda_{\text{н}} = \lambda_{\text{св}} \left[ 1 - \frac{K_{V_{\text{н}}}}{1 / (1 - \lambda_{\text{н}} / \lambda_{\text{св}}) - (1 - K_{V_{\text{н}}}) / 3} \right], \quad (10)$$

где  $\lambda_{\text{св}}$  – коэффициент теплопроводности связующего материала;  $\lambda_{\text{н}}$  – коэффициент теплопроводности наполнителя;  $K_{V_{\text{н}}}$  – объемная концентрация наполнителя в пропиточном составе.

Аналогичный расчет эквивалентной теплопроводности можно реализовать для любых обмоток намоточных изделий.

Объемная концентрация наполнителя в пропиточном составе, остающаяся в обмотке после ее сушки, определяется многими факторами и в первую очередь адгезией пропиточного лака на поверхности частиц феррита. Адгезия лака зависит от величины краевого угла смачивания, коэффициента поверхностного натяжения и многих других факторов, расчет которых затруднен вследствие малых размеров частиц и их сложной формы.

Поэтому целесообразно поставить ряд экспериментов по определению зависимости содержания наполнителя в отвержденной смеси от первоначального пропиточного состава и напряженности магнитного поля при пропитке.

#### Экспериментальная часть

На качество пропитки обмоток оказывают влияние ряд физических параметров пропиточных составов. Для определения этих параметров необходимо экспериментально исследовать следующие зависимости:

- а) теплопроводности материала от концентрации наполнителей;
- б) магнитной проницаемости состава от концентрации феррита;
- в) вязкости от концентрации;
- г) содержания наполнителя в обмотке после сушки от первоначальной его концентрации в смеси;
- д) электрической прочности материала от концентрации наполнителя.

Для исследований были приготовлены композиции на основе порошка феррита М400НН, алюминиевой пудры и пропиточного терморезактивного компаунда КП-34. Составы композиций приведены в табл. 1. Составы 7–13 использовались для проведения эксперимента только по пунктам (а, д).

Для того, чтобы никель-цинковые частицы и частицы алюминиевой пудры свободно проходили в межвитковые полости, необходимо, чтобы размер  $d_{\text{ч}}$  зерна никель-цинковых частиц и частиц зерна алюминиевой пудры был много меньше диаметра  $d_{\text{кан}}$  межвитковых полостей. Проведенные нами оценки показали, что это условие удовлетворяется при выполнении неравенства  $d_{\text{ч}} \ll d_{\text{кан}}$ . В наших опытах размер ферромагнитных частиц и частиц алюминиевой пудры удовлетворял упомянутому неравенству при размерах диаметра частиц  $d_{\text{ч}} \leq 2$  мкм.

Подготовка смесей компаунда с ферромагнитными и алюминиевыми частицами осуществля-

лась путем предварительного взвешивания всех компонентов, в высыпании взвешенных частей ферромагнитных и алюминиевых частиц в КП-34 и в тщательном перемешивании полученного состава до образования однородной массы.

Таблица 1. Состав магнитоэлектрической смеси

Table 1. Composition of the magnetodielectric mixture

№ состава Composition	Содержание КП-34, вес. % CP-34 content, wt. %	Содержание феррочастиц, вес. % Ferrite particles content, wt. %	Содержание алюминиевой пудры, вес. % Aluminum powder content, wt. %	Объемная доля феррочастиц, P Ferrite particles volume ratio, P	Объемная доля алюминиевой пудры, P Aluminum powder volume ratio, P
1	80	20	-	0,077	-
2	70	30	-	0,096	-
3	60	40	-	0,16	-
4	50	50	-	0,25	-
5	40	60	-	0,33	-
6	30	70	-	0,45	-
7	30	68	2	0,44	0,024
8	30	67	3	0,41	0,04
9	30	65	3	0,37	0,064
10	30	60	10	0,33	0,13
11	67	30	3	-	0,04
12	65	30	5	-	0,064
13	60	30	10	-	0,13
14	100	-	-	-	-

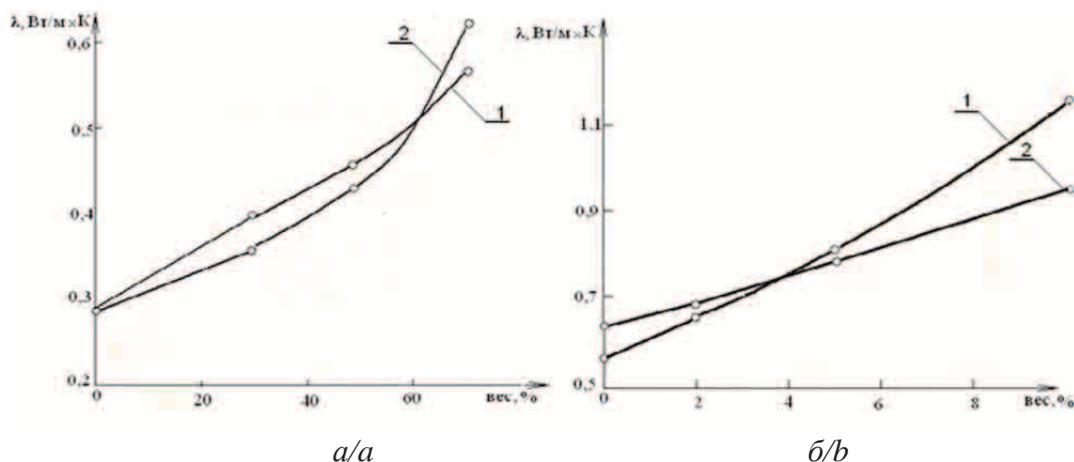
Для опытного определения коэффициента теплопроводности различных материалов существуют способы абсолютные и относительные. Для нашего случая выбираем последний метод. Он основан на измерении разности температур между концами образца при установившемся тепловом потоке. Этот метод, предложенный Христиансенем [3], состоит в следующем.

Между нагревателем с температурой  $T_1$  и холодильником с температурой  $T_3$  помещен испытуемый образец и эталон в виде пластинок одинакового поперечного сечения.

Для обеспечения надежных тепловых контактов между нагревателем, образцом, эталоном и холодильником предусматриваются металлические прокладки. Температура прокладок между образцом и эталоном  $T_2$  измеряется термометром. Прибор окружается теплоизоляцией. Об установившемся тепловом потоке можно судить по стабилизации показаний термометра во времени. Нагревающей средой является кипящая вода, а охлаждающей – лед, так что  $T_1=100$  °С,  $T_3=0$  °С. В качестве эталонной была взята пластинка отвержденного компаунда КП-34. Теплопроводность испытуемого материала определялась по формуле

$$\lambda_{\text{н}} = \lambda_{\text{э}} \frac{(T_2 - T_3)h_1}{(T_1 - T_2)h_2}, \quad (11)$$

где  $\lambda_{\text{э}}$  – коэффициент теплопроводности эталона;  $h_1, h_2$  – толщина образца и эталона, в нашем случае  $h_1 > h_2$ .



**Рис. 1.** Зависимость теплопроводности смеси: а) от содержания феррита М400НН; б) от содержания алюминиевой пудры (при концентрации феррита М400НН 60 вес. %). 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

**Fig. 1.** Dependence of thermal conductivity of the mixture: a) on the content of the ferrite MN; b) on the content of aluminum powder (at a concentration of ferrite MN 60 wt. %). 1 – experimental curve; 2 – theoretical curve

По формуле (11) определяется теоретическое значение теплопроводности состава.

Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 1.

**Таблица 2.** Коэффициент теплопроводности смесей

**Table 2.** Thermal conductivity coefficient of the mixtures

№ состава Composition	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\text{и}}(\text{эксп}), \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\lambda_{\text{и}}(\text{теор}), \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\lambda_{\text{э}}, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
		$\lambda_{\text{и}}(\text{exper}), \text{W/m}\cdot\text{K}$	$\lambda_{\text{и}}(\text{theor}), \text{W/m}\cdot\text{K}$	
2	59	0,4	0,36	0,28
4	62	0,46	0,43	
6	67	0,57	0,62	
7	70	0,65	0,68	
9	74	0,8	0,77	
10	80	0,12	0,94	

Вязкость масел, лаков, компаундов, применяемых для пропитки изоляции, имеет весьма существенное значение для проведения соответствующих технологических процессов.

Существует несколько различных видов вязкости: динамическая, кинематическая и условная, определяемая в технике упрощенными, условными способами.

Вязкость всех жидкостей, если только они при нагреве не претерпевают химических изменений, заметно уменьшается с повышением температуры. Поэтому при определении вязкости необходимо знать точную величину заданной температуры испытуемой жидкости во время измерения, с этой целью, как правило, приборы снабжаются водяной баней или другими приёмами для создания и поддержания требуемой температуры жидкости.

Определение вязкости производится с помощью вискозиметров. В зависимости от устройства прибора он может служить для измерения либо условной, либо динамической вязкостей, либо для получения значений кинематической вязкости.

В нашем случае определили условную вязкость пропиточных составов. При этом использовали вискозиметр типа ВЗ-246, разработанный для измерения вязкости электроизоляционных лаков. Этот вискозиметр используется для испытания лаков по времени истечения 20–150 секунд.

Вискозиметр ВЗ-246 имеет объем воронки 100 мл, диаметр сопла 4 мм, высоту сопла 4 мм. Воронка заливается до краев испытуемым лаком с температурой 20 °С.

Методика испытания следующая:

- 1) испытуемая жидкость заливается в конусообразную воронку ВЗ-246;
- 2) открывают кран выпускаемого отверстия (сопла);
- 3) измеряют по секундомеру время истечения (в секундах) 100 мл жидкости;
- 4) секундомер останавливают в момент первого появления прерывающейся струи.

Это время принимается за меру вязкости. Результаты измерений приведены в табл. 3 и на рис. 2.

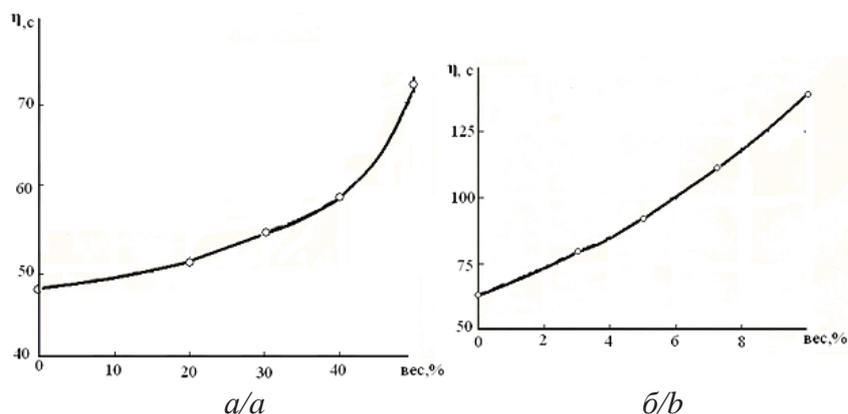
**Таблица 3.** Вязкость смесей

**Table 3.** Viscosity of mixtures

№ состава/Composition	1	2	3	4	11	12	13	14
Вязкость, с/Viscosity, s	51	55	59	72	82	91	140	48

В табл. 3 указаны номера составов, взятые из табл. 1, где для каждого номера указано весовое процентное содержание компаунда КП-34, ферритовых частиц и частиц алюминиевой пудры. Например, состав № 14 – это чистый КП-34, без примесей в нем ферритовых частиц и алюминиевой пудры. Составы 1–4 не содержат алюминиевой пудры, а состоят только из смеси компаунда КП-34 и ферромагнитных частиц, смешанных в разных пропорциях, и т. д.

Как следует из табл. 3, вязкость КП-34 (состав № 14) в исходном состоянии была равна 48 с. При



**Рис. 2.** Зависимость вязкости смеси: а) от содержания феррита М400НН; б) содержания алюминиевой пудры

**Fig. 2.** Dependence of the mixture viscosity: a) on the content of the ferrite MN; b) on the content of aluminum powder

добавлении в КП-34 ферромагнитных частиц и алюминиевой пудры вязкость смеси, по сравнению с исходным компаундом, возрастает.

Из рис. 2 видно, что добавка алюминиевой пудры, даже в незначительных количествах, приводит к резкому увеличению вязкости состава, поэтому добавлять в смесь более 5 вес. % алюминиевой пудры нецелесообразно.

Для изучения магнитных свойств смеси из неё были изготовлены кольца. После запекания колец, изготовленных из той или иной смеси, проводился контроль их геометрических размеров, затем на каждое кольцо наматывали по 32 витка провода диаметром 0,86 мм марки ПЭВШО-2 и измеряли индуктивность  $L$  намотанной на кольцо катушки. Расчет начальной магнитной проницаемости магнитного сердечника из соответствующей смеси  $\mu$  осуществлялся по формуле

$$\mu = \frac{Ll_c}{\mu_0 w^2 Q_c}, \quad (12)$$

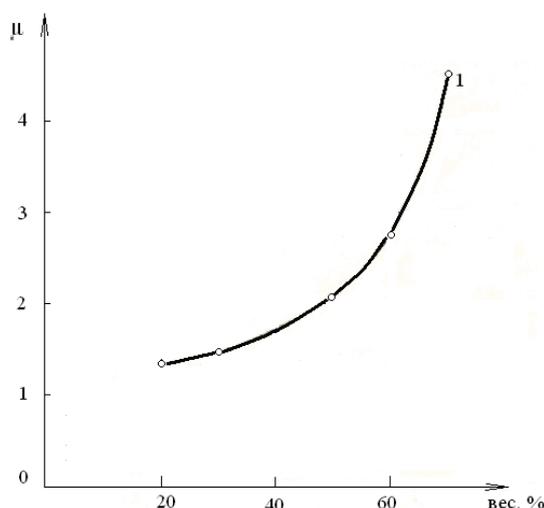
где  $L$  – индуктивность, Гн;  $w$  – число, витков;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;  $l_c$  – средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе, м;  $Q_c$  – площадь поперечного сечения магнитопровода, м<sup>2</sup>;  $D$  – внешний диаметр магнитного сердечника, м;  $d$  – внутренний диаметр магнитного сердечника, м;  $h$  – толщина магнитного сердечника, м.

Если в формулу (12) подставлять значения  $L$  (мкГн), среднюю длину магнитной силовой линии в магнитопроводе  $l_c$  (мм), а площадь поперечного сечения магнитопровода  $Q_c$  (мм<sup>2</sup>), то можно получить более удобную для вычисления формулу:

$$\mu = \frac{796Ll_c}{w^2 Q_c}. \quad (13)$$

Все изготовленные магнитные сердечники имели одинаковые размеры:  $D \cong 24$  мм;  $d \cong 14,8$  мм;  $h \cong 7$  мм.

Результаты расчетов и измерений представлены в табл. 4 и на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость магнитной проницаемости смеси от содержания феррита М400НН

**Fig. 3.** Dependence of the magnetic permeability of the mixture on ferrite content M400NN

Измерения проводились на частоте  $f=100$  кГц. Из рис. 3 видно, что магнитная проницаемость смеси растет практически экспоненциально с увеличением концентрации ферромагнитных частиц.

**Таблица 4.** Магнитная проницаемость смеси

**Table 4.** Magnetic permeability of the mixture

№ состава Composition	Индуктивность, мкГн Inductivity, mH	Относительная магнитная проницаемость Relative magnetic permittivity	
		теоретическая theoretic	экспериментальная experimental
1	0,94	1,25	1,31
2	1,1	1,32	1,46
3	1,4	1,99	2,1
4	1,9	2,46	2,79
5	6,1	4,0	4,55

Испытание магнитоэлектрических составов на электрическую прочность осуществлялось следующим образом. На двух отрезках провода в эмалированной изоляции, друг против друга, наносились круговые дефекты длиной 5 мм. Провода скреплялись вместе отрезками полихлорвиниловой трубки. Около десяти подготовленных таким образом пар собирались в пакет и помещались в стеклянную пробирку. При помещении проводов в стеклянные трубки дефекты каждой из пар проводов смещались по длине трубки относительно дефектов остальных пар. Каждая пара нумеровалась. После размещения всех пар макетов в стеклянные трубки последние разогревались до температуры 110–120 °С и пропитывались струей смеси. Далее производилась сушка при температуре 160–170 °С. После сушки поочередно проводились испытания на пробой изоляции для каждой пары макетных образцов путем подачи между ними высокого постоянного напряжения, которое поднималось со скоростью 1 кВ/с. Величина пробоя для каждой пары регистрировалась. Результаты эксперимента приведены в табл. 5 и на рис. 4.

Таблица 5. Пробивное напряжение образцов

Table 5. Breakdown voltage of samples

№ состава Composition	2	6	7	8	9	10	12	14
Среднее пробивное напряжение, кВ Average breakdown voltage, kV	3,8	2,1	1,7	0,9	0,6	0	0,6	4,0

Графики, приведенные на рис. 4, и значения пробивных напряжений пленок соответствующих составов, приведенные в табл. 5, отражают тенденцию, показывающую характер изменения пробивного напряжения пленок в зависимости от компонентного содержания составов. Для более точного определения влияния ферритовых добавок на электрическую прочность был проведен эксперимент на

образцах, изготовленных по ГОСТ 2256–59. Испытания, во избежание разряда по поверхности образцов, проводилось в трансформаторном масле. Пробивное напряжение образцов определялось при плавном подъеме на установке УПУ-1М. Для образцов, изготовленных из пропиточной смеси, содержащей 30 % массовых долей феррита (состав № 2), пробивная напряженность составляла 35–45 кВ/мм. Такую же электрическую прочность имели образцы, изготовленные из чистого компаунда КП-34 (состав № 14).

Для исследования зависимости содержания феррита в пропитанной обмотке от первоначальной концентрации смеси и напряженности магнитного поля вокруг проводов обмотки при пропитке были изготовлены торроидальные обмотки без сердечника, содержащие по 47 витков провода марки ПЭВ диаметром 0,8 мм в один слой. Через обмотки, помещенные в пропиточный состав, пропускали ток. Под действием образовавшегося магнитного поля ферромагнитные частицы втягивались внутрь обмотки и удерживались там. После извлечения обмотки из смеси ток не отключался и созданное им магнитное поле продолжало действовать на ферромагнитные частицы, препятствуя вытеканию пропиточного состава из обмотки. Излишним пропиточного состава давали стечь и производили сушку обмотки. В результате внутри обмотки образовывался сердечник из отвержденной массы пропиточного состава. У освобожденного от провода сердечника измерялась масса и объем. Таким образом, были получены зависимости этих величин от концентрации пропиточного состава и напряженности магнитного поля. Определение концентрации феррита в удержанной в обмотке смеси рассчитывался по формуле

$$K_{\phi} = \frac{\rho_{\phi}\rho_{\pi}(m_{\pi} / \rho_{\pi} - V_{\pi})}{(\rho_{\pi} - \rho_{\phi})m_{\pi}}, \quad (14)$$

где  $m_{\pi}$  – масса полученного сердечника;  $V_{\pi}$  – его объем;  $\rho_{\phi}$ ,  $\rho_{\pi}$  – плотности феррита и компаунда.

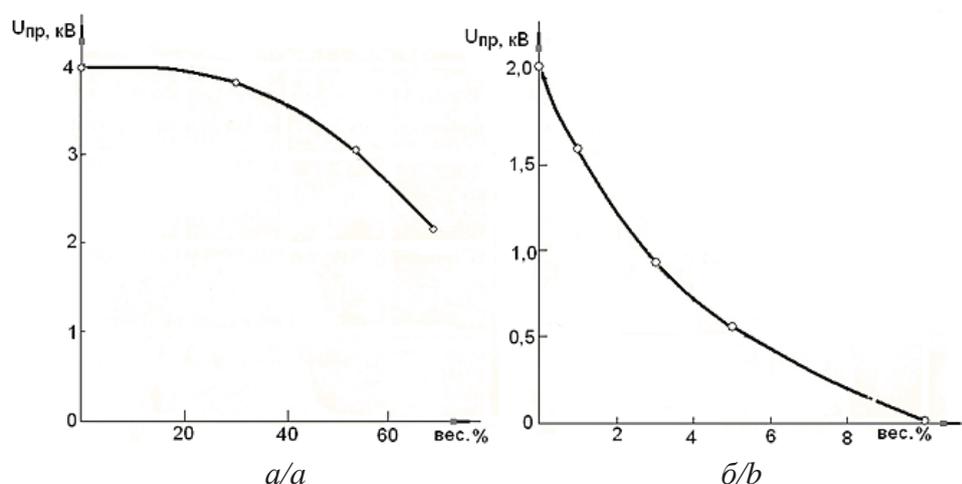


Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения от содержания феррита М400НН в пропиточной смеси (а) и алюминия (б)

Fig. 4. Dependence of breakdown voltage on the ferrite content М400НН in the impregnating mixture (a) and aluminum (b)

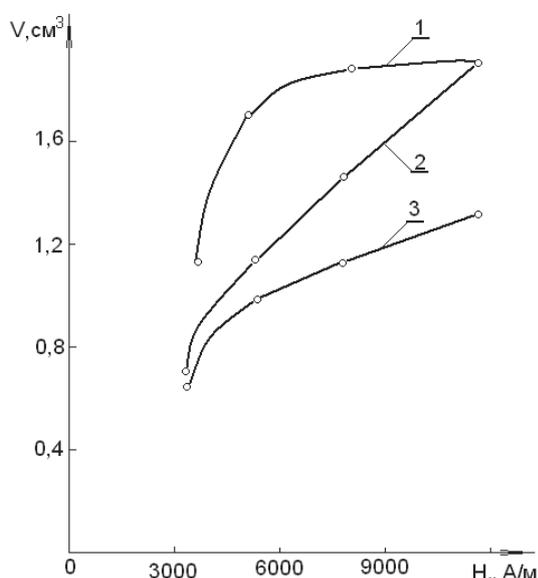
Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 6 и на рис. 5.

**Таблица 6.** Параметры отвержденной смеси

**Table 6.** Parameters of the cured mixture

№ состава Composition	Ток I, A Current I, A	Напряженность магнитного поля H, A/м Magnetic-field intensity M, A/m	Объем $V_n$ , см <sup>3</sup> Volume $V_c$ , cm <sup>3</sup>	$m_n$ , г $m_c$ , g	$K_\phi$ , вес. % $K_i$ , wt. %
1	5	3800			
	7	5350	1,00	2,06	63
	10	7650	1,1	2,65	69
	15	11500	1,3	2,79	66
2	5	3800	0,7	1,63	71
	7	5350	1,1	2,40	66

Из табл. 6 видно, что концентрация феррита в отвержденных образцах из составов 1 и 2 практически не зависит от первоначальной концентрации и напряженности магнитного поля при пропитке. Снижение концентрации  $K_\phi$  для образца из состава 4 объясняется снижением плотности отвержденной смеси вследствие увеличения воздушных включений, поскольку вакуумирование смеси не производится. Исследование полученных образцов на микроскопе МИИ-4 показало, что число воздушных включений уменьшится с уменьшением содержания феррита в смеси.



**Рис. 5.** Зависимость объема удержанной в обмотке смеси от напряженности магнитного поля для различных концентраций феррита М400НН: 1) 50 вес. %; 2) 30 вес. %; 3) 20 вес. %

**Fig. 5.** Dependence of the volume retained in the mixture winding on the magnetic field for various concentrations of ferrite MN: 1) 50 wt. %; 2) 30 wt. %; 3) 20 wt. %

Из рис. 5. видно, что максимальный объем заполнения обмотки пропиточным составом для различных первоначальных концентраций феррита в смеси достигается при разных напряженностях

магнитного поля, поэтому пользуясь этими зависимостями можно подобрать состав смеси, наиболее полно отвечающий поставленным требованиям при заданной допустимой напряженности поля.

Приведенные выше результаты стимулировали поиск путей совершенствования типовой струйно-капельной технологии пропитки, использующей различные компаунды, в том числе и компаунд КП-34.

Пропитка происходит следующим образом: пропитываемое изделие подключают к источнику тока, с помощью которого происходит разогрев обмотки до температуры, определяемой свойствами применяемого пропиточного лака. Затем изделию придают вращение с некоторой постоянной скоростью, а на лобовую часть обмотки тонкой струей подают пропиточный лак, который, соприкасаясь с нагретыми слоями обмотки, уменьшает вязкость и под действием капиллярных сил проникает внутрь изделия. Вращение необходимо для равномерного заполнения пустот лаком. После завершения пропитки, не прекращая вращения, увеличивают подачу тока через пропитанную обмотку, доводя её температуру до температуры полимеризации лака, и производят сушку.

Основные недостатки типовой струйно-капельной пропитки:

- высокая энергоёмкость, связанная с необходимостью вращения гнезд с закрепленными на них статорными обмотками энергоёмкими электромеханическими устройствами;
- высокий шум, создаваемый вращающимися элементами пропиточной установки;
- относительно низкие коэффициенты пропитки.

Под коэффициентом пропитки понимается отношение объёма сухого остатка пропиточного состава, оставшегося в обмотке после пропитки и сушки, к объёму пор и межвитковых полостей непропитанной обмотки [1].

Относительно низкие коэффициенты пропитки в типовой струйно-капельной пропитке обусловлены тем, что по завершении пропитки в процессе сушки происходит интенсивное вытекание пропиточного состава из обмотки в силу того, что вязкость компаунда при его разогреве на первых порах сушки резко снижается.

Применение предложенного нами магнетодиэлектрического состава, рассмотренного выше, позволяет устранить указанные выше недостатки традиционной технологии. Это достигается за счет того, что струя магнетодиэлектрического пропиточного состава легко управляется магнитным полем индуктора: её можно изгибать, вращать и вибрировать. Это позволяет устранить из типовой струйно-капельной пропитки энергоёмкие, шумящие электромеханические устройства, вращающие пропитываемые статорные обмотки с магнитным сердечником [21–25]. Предлагаемая нами в работе [21] пропитка отличается от типовой струйно-капельной пропитки тем, что обмотка первоначально разогревается током до регламентированной технологической документацией температу-

ры. После этого ток от обмотки отключается, на лобовую часть неподвижной статорной обмотки подается струя магнитодиэлектрического состава, изогнутая и вращающаяся магнитным полем с определенной частотой. После завершения пропитки через обмотку вновь начинают пропускать греющий ток. При подводе греющего тока к пропитанной обмотке в ней возникает поперечное магнитное поле, под действием которого происходит упорядоченная ориентация частиц ферромагнитного наполнителя и их жесткая фиксация в межвитковых полостях обмотки. Межвитковые полости «запираются» возникшим электромагнитным затвором, и вытекание пропиточного состава из обмотки прекращается, что приводит к значительному повышению коэффициентов пропитки.

Коэффициенты пропитки в обмотках, пропитанных по типовой и предлагаемой нами технологии, определялись электротепловым способом [1].

После окончательной сушки изделия охлаждаются и отправляют на участок контроля и сборки.

Эксперименты по выявлению возможностей рассматриваемой технологии пропитки с целью повышения коэффициентов заполняемости обмоток пропиточным составом и влияния этих коэффициентов на уровень перегрева обмоток проводились на 12 электродвигателях 4АМ112М4УЗ. Предварительно все 12 непропитанных обмоток электродвигателей исследовались на перегрев. После испытаний все обмотки 12 электродвигателей пропитывались: 6 обмоток – чистым компаундом КП-34, а 6 других – магнитодиэлектрическим составом, содержащим 30 мас. % никель-цинкового феррита М400 НН (состав № 2). Магнитные сердечники всех электродвигателей были изготовлены из одной и той же стали, на одном штампе. Обмотки наматывались на одном и том же обмоточном станке из провода одной партии

Все статоры до пропитки взвешивались. По результатам взвешивания определялись масса пропиточного состава, оставшегося в обмотках после пропитки и сушки, и усредненные коэффициенты заполняемости обмоток составом. Для повышения достоверности коэффициенты пропитки определялись дополнительно электротепловым методом [24, 25]. Под коэффициентом пропитки  $K_{инп}$  понималась величина отношения массы  $m_{св}$  сухого пропиточного состава, оставшегося в межвитковых полостях  $i$ -й контролируемой обмотки, к предельной массе того же сухого пропиточного состава  $m_0$ , которую можно разместить в межвитковых полостях обмотки. О том, как определить обе указанные величины, подробно изложено в работах [1, 24, 25]. Результаты измерения коэффициентов пропитки обмоток всех 12 статоров приведены в табл. 7.

Из табл. 7 следует, что пропитка обмоток электродвигателей магнитодиэлектрическим композиционным составом позволила повысить коэффициент пропитки, по сравнению с традиционной струйно-капельной пропиткой чистым компаундом КП-34, в среднем в 1,4 раза (с 0,6 до 0,84).

**Таблица 7.** Коэффициенты пропитки обмоток испытуемых статоров

**Table 7.** Coefficients of windings impregnation of the under consideration stators

$K_{инп}$ при пропитке компаундом КП-34 $K_{wi}$ when impregnated with КП-34 compaund					$K_{инп}$ при пропитке составом № 2 $K_{wi}$ when impregnated with no. 2 compaund						
0,61	0,59	0,6	0,58	0,59	0,63	0,86	0,82	0,84	0,84	0,85	0,83

После пропитки и сушки обмоток электродвигателей они вновь подвергались испытанию на нагрев в продолжительном номинальном режиме работы. Превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды определяли методом сопротивления.

Было установлено, что пропитка обмоток электродвигателей компаундом КП-34 приводит в среднем к снижению перегрева обмоток на величину 6,3 °С, в то время как пропитка обмоток магнитодиэлектрическим составом привела в среднем к снижению уровня перегрева обмоток на 8,3 °С. Таким образом, предлагаемая нами пропитка обмоток электродвигателей магнитодиэлектрическим составом привела к снижению перегрева обмоток статоров, по сравнению с типовой струйно-капельной пропиткой, в среднем на 31 %.

#### Результаты и их обсуждение

Из всего количества полученных во время эксперимента зависимостей наибольший интерес представляет зависимость объема удержанной смеси в полостях обмотки после пропитки от напряженности магнитного поля и начального содержания наполнителя в пропиточном составе (рис. 2).

Из представленной зависимости можно заключить, что при использовании состава № 4 возможно добиться полного заполнения пустот при значительно меньшей напряженности магнитного поля, чем при использовании составов № 1 и 2. Однако состав № 4 обладает значительно большей вязкостью, поэтому время пропитки этим составом будет больше. К тому же при использовании этого состава в отвержденной смеси присутствует большее количество воздушных включений, что уменьшает общую плотность массы, а следовательно, и ее теплопроводность. Наиболее плотная масса получается при использовании состава № 1, но для полного заполнения полостей обмотки пропиточным составом в этом случае необходима большая напряженность магнитного поля, которая не всегда достижима из-за ограничения возможного максимального тока через обмотку. Из эксперимента видно, что содержание феррита в отвержденной смеси практически не зависит от начального компонентного состава и от напряженности поля при пропитке и составляет примерно 68 вес. %.

Присутствие алюминия в смеси дает значительное увеличение её теплопроводности (рис. 3), снижает степень черноты поверхности ИЭ примерно до 0,3, что способствует уменьшению теплового влияния ИЭ на другие элементы схемы.

При изучении зависимости пробивного напряжения от состава смесей (рис. 4) были сделаны следующие выводы:

1. Присутствие порошка феррита в пропиточном составе незначительно влияет на величину пробивного напряжения.
2. Добавление алюминия в пропиточный состав приводит к резкому снижению его пробивного напряжения (рис. 4), а при концентрации алюминия более 10 вес. % – к короткому замыканию, т. е. смесь становится проводящей. Поэтому присутствие алюминиевой пудры в пропиточном составе допустимо только в небольших количествах (не более 3 вес. %) и только при пропитке ИЭ, работающих на низких напряжениях.

В результате анализа эксперимента в качестве оптимальных для пропитки являются смеси № 2 и 11, имеющие в своем составе алюминиевую пудру. Эти составы при относительно малой вязкости требуют для качественной пропитки сравнительно малую напряженность поля и после отверждения пропиточного состава дают массу с небольшой пористостью.

#### Заключение

Рассмотренный в статье магнитодиэлектрический состав имеет ряд технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с обычными компаундами, применяемыми для пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических намоточных изделий. Однако преимущества предлагаемого магнитодиэлектрического состава наи-

более ощутимы при его использовании для пропитки обмоток электрических машин струйно-капельным методом. Об этом, в частности, свидетельствуют полученные нами патенты [5–7]. Применение магнитодиэлектрического состава в данном виде пропитки позволяет, во-первых, устранить все энергоёмкие, шумящие электромеханические устройства, при помощи которых обмотки вращаются под падающей на лобовые части обмоток струей пропиточного состава, так как струю можно изгибать и вращать вдоль лобовой части пропитываемых обмоток вращающимся электромагнитным полем. Для более равномерного полива лобовых частей струю можно вибрировать модуляцией вращающегося магнитного поля [21]. По завершении пропитки в обмотку подаётся греющий ток, магнитное поле которого служит своеобразным затвором, с помощью которого пропиточный состав прекращает вытекать из полостей обмотки при их сушке. Это способствует значительному увеличению коэффициента пропитки обмоток. Кроме того, по завершении пропитки можно осуществлять «обволакивание» лобовых частей обмоток упомянутым магнитодиэлектрическим составом, если в процессе токовой сушки обмоток продолжать поливать лобовые части предлагаемым составом [6]. Высокая теплопроводность предлагаемой смеси и высокие коэффициенты пропитки позволяют снизить перегрев обмоток при их эксплуатации, что в несколько раз повышает их эксплуатационную надежность и долговечность.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания «Наука».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
2. Голдберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного назначения. – М.: Знание, 1976. – 55 с.
3. Борисенко А.И., Костинов О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
4. Смирнов Г.В., Хасанов О.Л., Полисадова В.В. Магнитодиэлектрический компаунд с добавками УДП порошка Zn-Ni для улучшения свойств обмоток электротехнических изделий // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6/2. – С. 291–296.
5. Способ изготовления обмотанных магнитопроводов: авторское свидетельство СССР № 1246257; заявл.11.04.84; опубл. 23.07.86, Бюл. № 27. – 5 с.
6. Способ капсулирования обмоток электродвигателей: авторское свидетельство СССР № 1399859; заявл.07.04.86; опубл. 30.05.85, Бюл. № 20. – 3 с.
7. Способ пропитки обмоток электротехнических изделий: пат. Рос. Федерация № 2467452; заявл. 01.04.11; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32. – 4 с.
8. Дульнев Г.И., Зарытяк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиций материалов. – Л.: Энергия, 1984. – 186 с.
9. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние микроstructures на свойства радиопоглощающих никель-цинковых ферритов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2010. – № 4. – С. 18–22.
10. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние технологических факторов на диэлектрическую проницаемость и радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2011. – № 2. – С. 33–37.
11. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние технологических факторов на диэлектрическую проницаемость и радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов // Российская микроразработка. – 2012. – Т. 41. – № 8 – С. 31–35.
12. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние микроstructures на радиопоглощающие свойства никель-цинковых ферритов // Российская микроразработка. – 2011. – Т. 40. – № 8. – С. 574–577.
13. Андреев В.Г., Костишин В.Г., Вергазов Р.М. Перспективные радиопоглощающие материалы на основе наноструктурных никель-цинковых ферритов // Тезисы международной объединенной конференции «Кристаллофизика 21 века» и НКРК-2010. – М., 2010. – Т. 2. – С. 328–331.
14. Летюк Л.М., Балбашов А.М., Крутогин Д.Г. Технология производства материалов магнитоэлектроники. – М.: Металлургия, 1994. – 416 с.
15. Летюк Л.М., Костишин В.Г. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. – М.: МИСИС, 2005. – 351 с.
16. Способ пропитки обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2510564; заявл.18.07.12; опубл. 27.03.2014, Бюл. № 9. – 6 с.
17. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. – М.: Наука и основы технологии, 2009. – 736 с.
18. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов. – М.: Профессия, 2005. – 280 с.

19. Гордиенко В.П., Мустаца О.Н., Сальников В.Г. Влияние дисперсности частиц неорганической добавки на структуру и свойства линейного полиэтилена // Пластические массы. – 2007. – № 12. – С. 11–13.
20. Рамазанов М.А., Керимли С.Дж., Садыхов Р.З. Влияние постоянного магнитного поля на прочностные, диэлектрические и магнитные свойства композиций на основе полимеров и ферромагнетиков // Пластические массы. – 2005. – № 10. – С. 5–6.
21. Ragaini S.R., Tarule A.N. Dielectric and magnetoelectric properties in magnetodielectrics CMFO-SBN-composites // Journal of the American Ceramic Society. – 2013. – V. 39. – Iss. 8. – С. 331–341.
22. Фанг И., Ванг Л.И., Сонг И.П. Действие магнитного поля на диэлектрическую постоянную и электрическую поляризацию  $\text{Cr}_2\text{WO}_6$  // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып. 15. – С. 98–129.
23. Морченко А.Т., Панина Л.В., Подгорная С.В. Свойства магнитоэлектрических композитов в эффективной среде // Журнал нано- и электронной физики. – 2014. – Т. 6. – № 3. – С. 73–79.
24. Способ контроля качества пропитки обмоток электротехнических изделий: пат. Рос. Федерация № 22503116; заявл. 30.05.12; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 7 с.
25. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2521439; заявл. 20.04.14; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 22. – 5 с.

Поступила 13.10.2015 г.

UDC 621.315.6(088.8)

## THE APPLICATION OF MAGNETO-DIELECTRIC COMPOSITE MIXTURE FOR ALTERNATIVE TECHNOLOGY OF WINDING IMPREGNATION IN ELECTRICAL AND RADIO ENGINEERING PRODUCTS

**Gennadiy V. Smirnov,**

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Oleg L. Khasanov,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: khasanov@tpu.ru

**Dmitriy G. Smirnov,**

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Valentina V. Polisadova,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: polis@tpu.ru

**Mariya S. Petyukevich,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: petukevich@tpu.ru

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need to improve the technology of winding impregnation to increase its quality and reliability.

**The main aim of the study:** to justify the choice of magneto-dielectric impregnating compound and perspective of its use for alternative technology of winding impregnation in electrical and radio engineering products.

**The methods used in the study:** the electro-thermal – to estimate heat conductivity and heat capacity; the electro-magnetic – to define the function of mixture magnetic conductivity from concentration of ferrite; the viscometers – to determine impregnating compound viscosity; capacitive – to control the saturation degree of interturn winding hole by impregnating compound; high-voltage – to investigate the electric strength of composition.

**The results.** The authors found out that application of magneto-dielectric compound for impregnating the electrotechnical windings and radio technical coil products in the first place allows to eliminate all power-consuming, noisy electromechanical devices. Secondly, permits to provide the equal glazing of face parts. Thirdly, the using of magneto-dielectric compound allows to improve the saturation degree of interturn winding hole by impregnating compound. This is achieved through heating current supply to coil after the impregnation, magnetic force of which serves as a gate, whereby the impregnating composition stops to flow out of the cavities during their drying. The high thermal conductivity of the proposed mixture and high rates of impregnation can reduce overheating of the windings, which in several times increases their reliability and durability. It was shown, that the nickel-zinc soft magnetic particles can improve the conductivity of the impregnating mixture more than one and a half times. Thus, magneto-dielectric technological properties of the mixture (viscosity, dielectric strength, etc.) remain within acceptable limits. Higher thermal conductivity of the considered magneto-dielectric mixture, in comparison with the thermal conductivity of the compound KP-34, traditionally used for inkjet-drip impregnation of stator windings, as well as high rates of impregnation when using magneto-dielectric composition, make it possible to reduce overheating of the stator windings not less than 30 %.

**Key words:**

Magneto-dielectric composite mixture, current, impregnating compound, impregnation, thermal conductivity, viscosity, magnetic field.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the state program «Science».

**REFERENCES**

- Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii elektrotekhnicheskikh izdeliy* [The insulation of the windings of electrical products]. Tomsk, TSU Publ., 1990. 192 p.
- Goldberg O.D. *Nadezhnost elektricheskikh mashin obshchepromyshlennogo naznacheniya* [Reliability of electrical machines for general industrial use]. Moscow, Znanie Publ., 1976. 55 p.
- Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh mashin* [Cooling of industrial machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
- Smirnov G.V., Khasanov O.L., Polisadova V.V. Magnitodielektricheskiy kompaund s dobavkami UDP poroshka Zn-Ni dlya uluchsheniya svoystv obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy [Magnetolectricity compound with additives UDP powder Zn-Ni to improve the properties of the windings of electrical products]. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 291–296.
- Khristyukov V.G., Smirnov G.V., Shcherb S.H. *Sposob izgotovleniya obmotannykh magnitoprovodov* [The method of manufacturing magnetic cores wrapped]. Patent USSR, no. 1246257, 1986.
- Smirnov G.V., Shcherb S.H. *Sposob kapsulirovaniya obmotok elektrodvigateley* [Method of encapsulation of electric motors]. Patent USSR, no. 1399859, 1985.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob propitki obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [The method of impregnation of windings of electrical products]. Patent RF, no. 2467452, 2012.
- Dulnev G.I., Zarytyak Yu.P. *Teplotoprovodnost smesey i kompozitsiy materialov* [The thermal conductivity of the mixtures and compositions of materials]. Leningrad, Energiya Publ., 1984. 186 p.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie mikrostruktury na svoystva radiopogloshchayushchikh nikel-tsinkovykh ferritov [Effect of microstructure on the properties of radio-nickel-zinc ferrite]. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki*, 2010, no. 4, pp. 18–22.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na dielektricheskuyu pronitsaemost i radiopogloshchayushchie kharakteristiki nikel-tsinkovykh ferritov [Influence of technological factors on the dielectric constant and the radio-absorbing characteristics of the nickel-zinc ferrite]. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki*, 2011, no. 2, pp. 33–37.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na dielektricheskuyu pronitsaemost i radiopogloshchayushchie kharakteristiki nikel-tsinkovykh ferritov [Influence of technological factors on dielectric permeability and radio-wave absorbing characteristics of nickel-zinc ferrites]. *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 8, pp. 31–35.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie mikrostruktury na radiopogloshchayushchie svoystva nikel-tsinkovykh ferritov [Effect of the microstructure on the properties of radio-absorbing nickel-zinc ferrites]. *Russian Microelectronics*, 2011, vol. 40, no. 8, pp. 574–577.
- Andreev V.G., Kostishin V.G., Vergazov R.M. Perspektivnye radiopogloshchayushchie materialy na osnove nanostrukturnykh nikel-tsinkovykh ferritov [Prospective radio-absorbing materials on the basis of nanostructured nickel-zinc ferrite]. *Tezisy Mezhdunarodnoy Obedinennoy Konferentsii «Kristalofizika 21 veka» i NKRK-2010* [Proc. of Int. Joint Conf. Crystal physics of the 21st century and NKRK-2010]. Moscow, 2010, vol. 2. pp. 328–331.
- Letyuk L.M., Balbashov A.M., Krutogin D.G. *Tekhnologiya proizvodstva materialov magnitoelektroniki* [The technology of materials for magneto-electronic production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 416 p.
- Letyuk L.M., Kostishin V.G. *Tekhnologiya ferritovykh materialov magnitoelektroniki* [Technology of ferrite materials magneto-electricity]. Moscow, MISiS Publ., 2005. 315 p.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob propitki obmotok elektrotekhnicheskikh mashin* [The method of impregnation of windings of electrical machines]. Patent RF, no. 2510564, 2014.
- Shakh V. *Spravochnoe rukovodstvo po ispytaniyam plastmass i analizu prichin ikh razrusheniya* [Reference guide for testing of plastics and analysis of the causes of their destruction]. Moscow, Nauka i osnovy tekhnologii Publ., 2009. 736 p.
- Kryzhanovskiy V.K. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Moscow, Professiya Publ., 2005. 280 p.
- Gordienko V.P., Mustyatsa O.N., Salnikov V.G. Vliyanie dispersnosti chastits neorganicheskoy dobavki na strukturu i svoystva lineynogo polietilena [Effect of particle fineness inorganic additives on the structure and properties of the linear polyethylene]. *Plastics*, 2007, vol. 12, pp. 11–13.
- Ramazanov M.A., Kerimli S.J., Sadykhov R.Z. Vliyanie postoyannogo magnitnogo polya na prochnostnye, dielektricheskie i magnitnye svoystva kompozitsiy na osnove polimerov i ferromagnitov [Effect of static magnetic field on the strength, dielectric and magnetic properties of compositions based on polymers and ferromagnetic]. *Plastics*, 2005, vol. 10, pp. 5–6.
- Ragaini S.R., Tarule A.N. Dielectric and magnetoelectric properties in magnetodielectrics CMFO-SBN-composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, vol. 39, pp. 331–341.
- Fung I., Wang L.Y., Song I.P. Deystvie magnitnogo polya na dielektricheskuyu postoyannuyu i elektricheskuyu polarizatsiyu  $\text{Cr}_2\text{WO}_6$  [Effect of magnetic field on dielectric constant and electric polarization  $\text{Cr}_2\text{WO}_6$ ]. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, no. 15, pp. 98–119.
- Morchenko A.T., Panina L.V., Podgornaya S.V. Svoystva magnitodielektricheskikh kompozitov v effektivnoy srede [On properties of magneto-dielectric composites in the effective medium approximation]. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 73–79.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob kontrolya kachestva propitki obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Method of controlling the quality of impregnation of windings of electrical products]. Patent RF, no. 22503116, 2013.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhdaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of impregnation curable polymer composition of the windings of electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.

Received: 13 October 2015.