

УДК 621.315. 6 (088.8)  
DOI: 10.17223/24135542/1/6

**Г.В. Смирнов<sup>1</sup>, О.Л. Хасанов<sup>2</sup>, Д.Г. Смирнов<sup>1</sup>,  
В.В. Полисадова<sup>2</sup>, М.С. Петюкевич<sup>2</sup>, З.Г. Бикбаева<sup>2</sup>, Т.В. Милованова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
(г. Томск, Россия)*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск, Россия)*

### **Применение магнитодиэлектрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин**

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ  
в рамках государственного задания «Наука» (проект № 533).

*Показано, что применение магнитодиэлектрической смеси на основе термореактивного компаунда КП-34 с добавкой 30 масс. % субмикронного порошка никель-цинкового феррита для пропитки обмоток электрических машин позволяет устранить все энергоемкие, шумящие электромеханические устройства, обеспечить более равномерный полив лобовых частей, повысить коэффициент пропитки обмоток и снизить уровень перегрева обмоток.*

**Ключевые слова:** *субмикронные порошки; магнитодиэлектрический композит; пропитка; теплопроводность; композит.*

Магнитодиэлектрические композитные материалы находят широкое применение в различных технологиях и изделиях. В частности, магнитодиэлектрические композиты на основе компаундов с добавками субмикронных магнитомягких никель-цинковых порошков применяют в устройствах, использующих или создающих сопутствующее электромагнитное излучение сверхвысокочастотного диапазона. Применение магнитодиэлектрических композитов с использованием добавок субмикронных порошков позволяет осуществлять экологическую защиту биологических объектов от его вредного воздействия, подавление помех средствам связи, а также обеспечить электромагнитную совместимость радиоэлектронной аппаратуры и предотвратить утечку информации по радиоканалу и т.п. [1–3].

Весьма перспективным, на наш взгляд, может стать применение магнитодиэлектрических композитных материалов в технологии пропитки обмоток электродвигателей различного назначения, поскольку от пропитки обмоток в значительной степени зависят показатели качества этого вида продукции [4–6]. К наиболее распространенным типам пропитки обмоток можно отнести струйно-капельную, особенности и недостатки которой отражены в работе [7].

Настоящая статья посвящена некоторым аспектам, позволяющим частично устранить указанные недостатки типовой струйно-капельной тех-

нологией пропитки и показать особенности и преимущества предлагаемой нами ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток на основе магнитодиэлектрического компаунда КП-34 и добавок к нему субмикронного порошка никель-цинкового феррита.

### **Расчетная часть**

Предлагаемый нами магнитодиэлектрический композит имеет следующий состав: пропиточный термореактивный компаунд КП-34 и субмикронный порошок магнитомягкого никель-цинкового феррита марки М 400 НН в качестве наполнителя. Предлагаемый магнитодиэлектрический композит имеет более высокую теплопроводность, чем используемый для пропитки компаунд КП-34; обладает магнитными свойствами, что позволяет совершенствовать технологию струйно-капельной пропитки и повысить качество и надежность обмоток, что является весьма актуальным.

Максимально допустимый размер зерна порошка магнитомягкого никель-цинкового феррита М 400 НН, используемого в качестве добавки, должен быть таким, чтобы легко проходить в межвитковые и прикорпусные полости и капилляры. Порядок этой величины можно оценить следующим образом.

Коэффициент заполнения паза проводом обычно задается в конструктивной документации того или иного вида электродвигателей и равняется величине

$$K_3 = nS_{\text{пр}}/S_{\text{паза}}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество проводников в пазу;  $S_{\text{пр}}$  – площадь сечения провода;  $S_{\text{паза}}$  – свободная площадь поперечного сечения паза.

Межвитковые полости представляют собой капилляры, и их количество в пазу можно принять равным количеству проводников  $n$  в пазу. Если предположить, что упомянутые межвитковые полости (капилляры) имеют цилиндрическую форму и расположены между витками равномерно, то свободную площадь поперечного сечения паза можно представить в виде

$$S_{\text{паза}} = nS_{\text{пр}} + nS_{\text{кап}} = \pi n \left( \frac{d_{\text{пр}}^2 + d_{\text{кап}}^2}{4} \right), \quad (2)$$

где  $S_{\text{кап}} = \pi n \frac{d_{\text{кап}}^2}{4}$  – поперечное сечение межвиткового капилляра;  $d_{\text{кап}}$  – средний диаметр капилляра.

Используя выражения (1) и (2), можно показать, что диаметр межвиткового капилляра  $d_{\text{кап}}$  связан с диаметром провода  $d_{\text{пр}}$  соотношением

$$d_{\text{кап}} = d_{\text{пр}} \sqrt{\left( \frac{1}{K_3} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Выбранный размер зерна никель-цинкового порошка должен быть таким, чтобы его можно было использовать при пропитке любых обмоток, в том числе и обмоток электродвигателей, изготовленных из относительно тонкого провода. Струйно-капельный метод пропитки применяется только для электрических машин крупносерийного производства с высотой центров до 200 мм. Диаметры  $d_{\text{пр}}$  используемых обмоточных проводов для обмоток с упомянутой высотой центров, как правило, больше 0,5 мм. По-

этому за минимальный размер диаметра провода, обмоток, пропитываемых струйным методом, можно принять диаметр провода  $d_{\text{пр}} = 0,5$  мм. Тогда при самом плотном заполнении паза проводом  $K_3 = 0,8$  диаметр межвитковой полости в соответствии с выражением (3) будет равен

$$d_{\text{кап}} = d_{\text{пр}} \sqrt{\left(\frac{1}{K_3} - 1\right)} = 0,5 \sqrt{\left(\frac{1}{0,8} - 1\right)} = 0,5 \times 0,5 = 0,125. \quad (4)$$

Для того чтобы никель-цинковые частицы порошка свободно проходили в межвитковые полости, необходим размер  $d_{\text{фер}}$  зерна частиц много меньше диаметра  $d_{\text{кап}}$  межвитковых полостей. Это осуществляется при выполнении неравенства  $d_{\text{фер}} \ll d_{\text{пол}}$  или исходя из выражения (4):

$$d_{\text{фер}} \ll 0,125 \text{ мм}. \quad (5)$$

Неравенство (5) надежно выполняется, если диаметр никель-цинковых частиц порошка не менее, чем на порядок, величины 0,1 мм, т.е. размер ферромагнитных частиц порошка должен удовлетворять неравенству

$$d_{\text{фер}} \leq 0,01 \text{ мм}. \quad (6)$$

### **Экспериментальная часть**

Вязкость многих материалов является характеристикой, необходимой для оценки их эксплуатационных и технологических свойств. Проведенные измерения вязкости композита в зависимости от процентного содержания в составе смеси субмикронного порошка никель-цинкового феррита показали, что при содержании его до 30 масс. % вязкость смеси изменяется незначительно и близка к вязкости КП-34.

Поэтому для всех дальнейших исследований была выбрана пропиточная смесь из пропиточного компаунда КП-34 с добавкой 30 масс. % субмикронного порошка никель-цинкового феррита. Измерение пробивного напряжения проводили по ГОСТ 2256-59, его определяли при плавном подъеме на установке УПУ-1М. Для пропиточных смесей, содержащих 30 масс. % феррита, оно составляло 35–45 кВ/мм.

Для исследования теплопроводности пропиточных смесей был использован метод неограниченного плоского слоя, применяемый при исследовании материалов с малой теплопроводностью (изоляционные материалы, пластмассы) [8].

Проведенные экспериментальные исследования показали, что чем выше процентное содержание порошка никель-цинкового феррита в смеси, тем выше коэффициент теплопроводности пропиточной смеси, меньше усадка, но при этом значительно увеличивается вязкость [7].

Экспериментально было установлено, что оптимальная добавка субмикронного порошка никель-цинкового феррита в компаунд должна составлять 30÷35 масс. %, так как вязкость пропиточной смеси в этом случае незначительно превышает величину вязкости компаунда КП-34, которая в стадии поставки лежит в пределах 50–100 с (ГОСТ 4Р0.029.260). При этом пробивное напряжение пропиточной смеси изменяется незначительно и отвечает требованиям, предъявляемым к пропиточным электроизоляционным лакам.

Следующим этапом работы по исследованию выбранного пропиточного состава КП-34 с добавкой субмикронного порошка никель-цинкового феррита марки М400НН были испытания на нагревание обмотанных статоров.

Статоры электродвигателей 4МП2М4УЗ были изготовлены на Производственном объединении «Сибэлектромотор» по обмоточным данным БМШИ 520031.001

Перед пропиткой все статоры подвергались испытанию на перегрев. С этой целью в каждой из обмоток подбирался такой ток, чтобы его протекание через обмотку в продолжительном режиме вызывало приблизительно одинаковый уровень их перегрева 90–96°C.

После испытаний на нагревание статоры были взвешены на весах с точностью до 0,1 г.

Были подготовлены статоры в количестве 12 шт. Группа статоров с номерами 5, 6, 7, 8 пропитывались компаундом КП-34, а вторая группа статоров с номерами 3, 4, 9, 10 подвергалась пропитке компаундом КП-34 с добавкой 30 масс. % субмикронного порошка никель-цинкового феррита.

Пропитку обмотки каждого из статоров № 3, 5, 6, 7, 9, 10 осуществляли подготовленной смесью или компаундом объемом 300 мл, поливая верхнюю лобовую часть с внешней и внутренней сторон в течение 6–8 мин. Обмотки статоров № 4 и 8 пропитывались объемом 400 мл. По завершении пропитки, в случае отключения греющего тока, к обмотке снова подвели ток, который выполнял две функции: разогревал пропиточный состав до температуры желирования и за счет влияния магнитного поля обмотки на частицы феррита осуществлял «запирание» капилляров обмотки, снижая вытекание пропиточного состава из нее.

При достижении температуры обмотки 150–160°C обмотку выдерживали до начала желирования состава, что достигалось через 6–8 мин после окончания пропитки.

После окончания сушки статоры взвешивали и проводили испытания обмоток статоров на перегрев. Результаты исследований сведены в таблице.

**Результаты исследований обмоток статоров**

Показатель	№ статора							
	7	5	6	8	3	10	9	4
$\Delta P$ , кг	0,192	0,219	0,269	0,274	0,309	0,338	0,352	0,478
$\Delta T_1$ , °C	89,8	96,4	96,2	95,2	96,1	97,8	96,0	94,9
$\Delta T_2$ , °C	84,0	86,2	92,2	90,0	88,9	90,5	84,8	87,4
$\Delta T_3$ , °C	84,7	81,3	88,3	84,7	91,9	82,2	83,1	80,5
$\Delta T_1 - \Delta T_2$ , °C	5,8	10,2	4,0	5,2	7,2	7,3	11,2	7,5
$\Delta T_1 - \Delta T_3$ , °C	5,1	15,1	7,9	10,5	4,2	15,6	12,9	14,4
$\Delta T_2 - \Delta T_3$ , °C	+0,7	-4,9	-3,9	-5,3	3	-8,3	1,7	-3,5
$P_{ст}$ , Вт	183	187	212	201	249	187	184	204

*Примечание.*  $\Delta P$  – привес статора после пропитки;  $\Delta T_1$  – перегрев обмотки непропитанного статора;  $\Delta T_2$  – перегрев обмотки пропитанного статора;  $\Delta T_3$  – перегрев обмотки в собранном электродвигателе;  $P_{ст}$  – мощность потерь.

Как следует из таблицы, пропитка обмоток статоров компаундом КП-34 (№ 5, 6, 7, 8) привела в среднем к снижению перегрева обмоток на величину  $6,3^{\circ}\text{C}$ , в то время как пропитка обмоток статоров компаундом КП-34 с 30%-ной добавкой субмикронного порошка никель-цинкового феррита (№ 3, 4, 9, 10) привела к снижению уровня перегрева обмоток в среднем на  $8,3^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, введение в качестве наполнителя добавки субмикронного порошка в компаунд привело к снижению уровня перегрева обмоток статоров, по сравнению со снижением уровня перегрева обмоток, пропитанных компаундом КП-34, в среднем на 31%.

Снижение перегрева обмоток после пропитки и сборки электродвигателей относительно перегрева обмоток непропитанных статоров с применением КП-34 составило в среднем  $9,65^{\circ}\text{C}$ , а с использованием магнитодиэлектрической смеси –  $11,78^{\circ}\text{C}$  (что отличается в среднем на 22%).

### **Заключение**

В данной работе показано, что предлагаемая магнитодиэлектрическая смесь обладает высокой теплопроводностью и позволяет получить при пропитке обмоток электрических машин высокие коэффициенты пропитки, что приводит к снижению перегрева обмоток при их эксплуатации. Это позволяет в несколько раз повысить их эксплуатационную надежность и устранить из технологического процесса пропитки обмоток энергоемкие, шумящие электромеханические устройства [5, 6]. Было установлено, что оптимальная добавка субмикронного порошка никель-цинкового феррита к термореактивному компаунду КП-34, используемому для пропитки обмоток электрических машин, должна составлять 30 масс. %.

### **Литература**

1. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2010. № 4. С. 18–22.
2. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2011. № 2. С. 33–37.
3. Kostishyn V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. // Russian Microelectronics. 2011. Vol. 40, No. 8. P. 574–577.
4. Jigajeni S.R., Tarale A.N. // J. Ceramic International. 2013. Vol. 39. P. 2331–2341.
5. Способ пропитки обмоток электротехнических изделий : пат. Рос. Федерация № 2467452; опубликовано: 20.11.2012. Бюл. № 32.
6. Способ пропитки обмоток электрических машин : пат. Рос. Федерация № 2510564; опубликовано: 27.03.2014. Бюл. № 9.
7. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1990. 192 с.
8. Валькеништейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических материалов. Л. : Энергия, 1971. 160 с.

**Авторский коллектив:**

**Смирнов Геннадий Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (г. Томск, Россия). E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Хасанов Олег Леонидович**, д-р техн. наук, профессор кафедры наноматериалов и нанотехнологий, заведующий кафедрой, директор Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия). E-mail: khasanov@tpu.ru

**Смирнов Дмитрий Геннадьевич**, канд. техн. наук, снс Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (г. Томск, Россия). E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Полисадова Валентина Валентиновна**, канд. техн. наук, инженер-исследователь кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия). E-mail: polis@tpu.ru

**Петюкевич Мария Станиславовна**, аспирант, инженер кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия). E-mail: petukevich@tpu.ru

**Бикбаева Зульфа Гадильзановна**, канд. техн. наук, инженер-исследователь кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия). E-mail: bikbaeva@tpu.ru

**Милованова Тамара Васильевна**, инженер кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия). E-mail: milovanova@tpu.ru

---

*Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2015, 1, 39-45. DOI: 10.17223/24135542/1/6

---

**G.V. Smirnov<sup>1</sup>, O.L. Khasanov<sup>2</sup>, D.G. Smirnov<sup>1</sup>, V.V. Polysadova<sup>2</sup>, \*M.S. Petyukovich<sup>2</sup>,  
Z.G. Bikbaeva<sup>2</sup>, T.V. Milovanova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Tomsk state university of control systems and radioelectronics (Tomsk, Russian Federation)

<sup>2</sup> National research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation)

\*E-mail: petukevich@tpu.ru

## **APPLICATION OF THE MAGNETODIELECTRIC COMPOSITES BASED ON NICKEL-ZINC PARTICLES FOR RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES TREATMENT WINDINGS OF ELECTRICAL MACHINES**

*It is known that the failures of electric motors are often the result of failure of the windings insulation. The technological mode of impregnation of the winding insulation by a compound and the subsequent drying has an essential influence on the indicators of reliability of winding insulation. The application of magneto-dielectric composite materials for impregnation of windings in the electric motors of different purposes can become very perspective because the quality and reliability of this type of products substantially depend on impregnation of windings. Therefore the works directed on improvement of reliability of winding insulations are very actual today.*

*The present work considers the possibility for application of a magneto-dielectric composite on the basis of an impregnating compound KP-34 with an additive of the ultradispersed powder of nickel-zinc particles used as a filler for resource-saving technology of windings impregnation in electric machines. The suggested magneto-dielectric composite has higher heat conductivity than KP-34 compound used for impregnation; possesses magnetic properties, which allows to improve the technology of jet-drip impregnation and to increase the quality and reliability of windings.*

*Calculations which have shown that the optimum additive of submicron Ni-Zn powder in the compound must make 30–35 wt. % are given. According to the given calculations the maximum permissible size of a grain in submicron Ni-Zn powder M400NN used as an additive must satisfy the inequality:  $d_{\text{фep}} \leq 0,01 \text{ mm}$ .*

*It was determined that application of the magneto-dielectric composite on the basis of ultradispersed powder of nickel-zinc particles and an impregnating compound KP-34 for impregnation of the windings in electric and electronic wire wrap products, allows to eliminate, first, all power-intensive, noisy electromechanical devices by means of which windings are rotated under the jet of the impregnating compound falling on the front parts, because the jet can be bent and rotated along the front parts of the impregnated windings by rotating magnetic field. Secondly, it allows to provide more uniform flow coating of the front parts because the jet of the mentioned composition can be influenced by magnetic field. Thirdly, it allows significantly to increase the impregnation coefficient of the windings, which shows a saturation degree of inturn cavity by the impregnating composition. After impregnation the heating current is supplied to the winding which magnetic field is like a peculiar valve by means of which the impregnating composition stops to flow from winding cavities at their drying. Besides, after impregnation the front parts of the windings can be capsulated by the mentioned magneto-dielectric composition. For this purpose it is necessary to coat the front parts by the suggested composition during the current drying of the windings. High heat conductivity of this magneto-dielectric composition and high coefficients of impregnation allow to reduce overheating of the windings during their operation, which results in improvement of their operational reliability and durability by several times.*

**Keywords:** *submicron powders; magnetic dielectric composite impregnation; thermal conductivity; the composite.*