

УДК 621.315.6(088.8)

Г.В. Смирнов, Д.Г. Смирнов

Пропитка обмоток электрических машин магнитодиэлектрическим композитом с ультрадисперсным никель-цинковым наполнителем

Приведены результаты исследования технологической операции пропитки обмоток компаундом, содержащим ультрадисперсный никель-цинковый наполнитель. Проведен сравнительный анализ качества традиционной пропитки компаундом КП-34 с пропиткой компаундом КП-34 с никель-цинковым ультрадисперсным наполнителем. Оценку качества пропитки осуществляли по коэффициенту пропитки, показывающему степень насыщенности полостей обмотки пропиточным составом. При проведении экспериментов был использован полный факторный эксперимент.

Ключевые слова: планирование эксперимента, ультрадисперсные порошки, магнитно-композиционные пропитки, намотки, теплопроводность, коэффициент пропитки.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-2-99-102

Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция обмоток электрических машин. Низкая надежность изоляции обмоток электрических машин во многом зависит от качества изоляции обмоточного провода, от намоточного оборудования и технологии пропитки. Именно в процессе пропитки обмоток пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции [1]. В результате пропитки повышаются не только электроизоляционные свойства обмоток, но и теплопроводность обмоток, их влагостойкость, монолитность и другие характеристики, повышающие надежность изоляции обмоток.

Все эти качественные изменения свойств обмотки после пропитки связаны с физическими свойствами самого пропиточного состава, а также со степенью заполнения указанным составом межвитковых полостей обмотки. Степень заполнения пропиточным составом полостей обмотки оценивают коэффициентом пропитки

$$K_{\text{пр}i} = \frac{m_i}{m_0}, \quad (1)$$

где m_i – масса сухого остатка пропиточного состава, оставшегося в полостях i -й обмотки после её пропитки и сушки; $m_0 = \rho V_0$ – предельная масса отвержденного пропиточного состава, которую можно разместить при 100% заполнении полостей обмотки; ρ – плотность отвержденного пропиточного состава; V_0 – объём полостей в обмотке. Коэффициент пропитки, приведенный в формуле (1), используют не только для индивидуальной оценки качества про-

питки каждой i -й обмотки, но и для оценки качества операции пропитки обмоток в целом [2]. Наиболее точный способ определения коэффициента пропитки из известных в настоящее время способов описан в работах [3, 4].

Методика и результаты эксперимента

В работе [5] рассмотрена технология пропитки обмоток магнитодиэлектрическим компаундом, в пропиточный состав которого наряду с компаундом КП-34 входит ультрадисперсный порошок магнитомягкого никель-цинкового наполнителя марки М400НН. Оптимальным весовым соотношением магнитодиэлектрического состава обладала смесь, состоящая из 70 вес. % компаунда КП-34 и 30 вес. % наполнителя М400НН. Применение указанного магнитодиэлектрического состава для пропитки обмоток при использовании токовой сушки позволяет предотвратить вытекание пропиточного состава в процессе его компаундирования и тем самым существенно повысить значение $K_{\text{пр}i}$. Этот факт был подтвержден экспериментально. Опыты проводились с использованием теории планирования экспериментов. В рассматриваемом случае для планирования экспериментов использовались $n = 2$ фактора: доза пропиточного состава V и напряжение предварительного подогрева, подаваемого на обмотку перед пропиткой U .

В соответствии с изложенными соображениями были выбраны уровни варьирования основных воздействующих факторов, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные факторы и уровни их варьирования

Фактор	Уровни			Действительное обозначение	Кодовое обозначение	Интервал варьирования
	+1	0	-1			
Доза жидкого компаунда, мл	103	89	75	V	X_1	14
Напряжение предварительного нагрева, В	47	44	41	U	X_2	3

В качестве функции отклика был взят коэффициент пропитки, определяемый по выражению (1). В опытах использовались статоры двигателей 4АМ80А4. Пропитка в экспериментах проводилась на заводской установке IG-1 двумя пропиточными

составами: компаундом КП-34 и смесью компаунда КП-34 с ультрадисперсным никель-цинковым порошком марки М400НН. Так как в обоих случаях функцию отклика будем находить в виде полинома второй степени, то все полученные результаты для

пропитки смесью компаунда с магнитномягким никель-цинковым ультрадисперсным порошком, будем обозначать звездочкой.

Обозначим через $K_{пр} = Y$ и $K_{пр}^* = Y^*$ соответствующую функцию отклика. В общем случае квадратичный полином, описывающий зависимость целевой функции от входных параметров, имеет вид

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2, \quad (2)$$

$$Y^* = b_0^* + b_1^*x_1 + b_2^*x_2 + b_{11}^*x_1^2 + b_{22}^*x_2^2 + b_{12}^*x_1x_2, \quad (3)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}, b_0^*, b_1^*, b_2^*, b_{11}^*, b_{22}^*, b_{12}^*$ – коэффициенты уравнений (2) и (3) регрессии; x_1, x_2 – кодированные переменные, найденные по формулам

$$x_1 = \frac{V - V_0}{\Delta V}, \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{U - U_0}{\Delta U}, \quad (5)$$

где $V_0 = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}$, $\Delta V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2}$,

$$U_0 = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}, \quad \Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2};$$

V_0, U_0 – центр плана; V_{\max}, U_{\max} – максимальный уровень фактора; V_{\min}, U_{\min} – минимальный уровень фактора; $\Delta V, \Delta U$ – интервал варьирования.

Максимальные и минимальные уровни, центр плана и интервал варьирования в натуральном масштабе и в безразмерных кодированных величинах указаны в табл. 1.

Для получения коэффициентов квадратичного полинома применяли композиционный план второго порядка. Матрица плана и результаты его реализации для коэффициента пропитки $K_{пр}$ приведены в табл. 2.

В табл. 2 через $Y_1, Y_2, Y_3, Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*$ обозначены коэффициенты пропитки каждой из трех фаз обмотки, соединенных звездой, которые определялись по способу [3] и рассматривались в качестве $m = 3$ параллельных опытов. Опыты проводились следующим образом. На непропитанные обмотки подавалось напряжение предварительного разогрева, величина которого указана в табл. 1.

Таблица 2

Матрица плана и результаты его реализации

Номер опыта	Варьируемые факторы		Коэффициент пропитки							
			Пропитка компаундом КП-34				Пропитка магнитодиэлектрическим составом 70 вес. % КП-34+30 вес. % 400 НН			
	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}_0	Y_1^*	Y_2^*	Y_3^*	Y_0^*
1	-1	-1	0,357	0,34	0,355	0,351	0,762	0,754	0,734	0,750
2	-1	+1	0,33	0,338	0,37	0,346	0,753	0,742	0,737	0,744
3	+1	-1	0,47	0,432	0,441	0,448	0,940	0,946	0,959	0,948
4	+1	+1	0,48	0,471	0,472	0,474	0,966	0,976	0,980	0,974
5	-1	0	0,361	0,362	0,388	0,370	0,783	0,789	0,795	0,789
6	+1	0	0,471	0,487	0,47	0,476	0,968	0,976	0,966	0,970
7	0	-1	0,415	0,42	0,431	0,422	0,876	0,880	0,875	0,877
8	0	+1	0,426	0,428	0,419	0,424	0,888	0,889	0,898	0,892
9	0	0	0,419	0,433	0,437	0,430	0,926	0,906	0,897	0,910

По истечении строго выверенного времени разогрева, которое автоматически поддерживалось в установке, греющее напряжение отключали и осуществляли пропитку обмоток порцией лака, указанной в матрице. По завершении пропитки через обмотку пропускали греющий ток путем подачи на неё стабильного греющего напряжения, величина которого автоматически устанавливалась на установке.

Расчетная часть

По результатам эксперимента, приведенным в табл. 2 рассчитывались коэффициенты уравнений регрессии (2) и (3) по известным формулам.

Расчеты осуществлялись с использованием программы Excel. Результаты расчетов приведены ниже. Для уравнения (2):

$$b_0 = 0,4413; \quad b_1 = 0,552;$$

$$b_2 = 0,038; \quad b_{12} = 0,0078;$$

$$b_{11} = -0,183; \quad b_{22} = -0,183.$$

Для уравнения (3):

$$b_0 = 0,913; \quad b_1 = 0,102; \quad b_2 = 0,0058; \quad b_{12} = 0,008;$$

$$b_{11} = -0,031; \quad b_{22} = -0,0285.$$

Однородность дисперсий оценивалась по критерию Кохрена в следующей последовательности.

Из параллельных опытов определялись выборочные дисперсии:

$$S_1^2 = \frac{\sum_{u=1}^{m=3} (y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{m-1}. \quad (6)$$

Находилась сумма дисперсий $\sum_{i=1}^N S_i^2$ и составлялось отношение

$$G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (7)$$

где S_{\max}^2 – максимальное значение выборочной дисперсии. Если дисперсии однородны, то

$$G_{\max} < G_{\alpha}(N, m-1), \quad (8)$$

где $G_{\alpha}(N, m-1)$ – табулированное значение критерия Кохрена при уровне значимости α . В рассматри-

ваемом нами случае расчетные значения критерия Кохрена были равны соответственно $G_{\max} = 0,307$ и $G_{\max}^* = 0,324$. Табличное значение критерия Кохрена $G_{\alpha}(N, m-1) = 0,4775$.

Так как соотношение (8) выполняется для обоих рассматриваемых случаев, то выборочные дисперсии однородны. Дисперсия воспроизводимости в случае однородных дисперсий рассчитывается по формуле

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}. \quad (9)$$

Число степеней свободы дисперсии f равно $f = N(m - 1)$. Дисперсия воспроизводимости необходима для оценки значимости коэффициентов регрессий (2) и (3) и их адекватности. Величины дисперсий воспроизводимости были равны соответственно: $S_{\text{воспр}}^2 = 0,000162$, $S_{\text{воспр}}^{*2} = 0,00083$. Значимость коэффициентов в уравнениях регрессий оценивалась по критерию Стьюдента. Для этого рассчитывалось среднестатистическое отклонение каждого из коэффициентов по формулам:

$$S_{b0} = \sqrt{\frac{c_1 S_{\text{воспр}}^2}{m}}, \quad (10)$$

$$S_{bj} = \frac{S_{\text{воспр}}}{\sqrt{m(2 + 2^n)}}, \quad (11)$$

$$S_{bjk} = \frac{S_{\text{воспр}}}{\sqrt{m \times 2^n}}, \quad (12)$$

$$S_{bij} = S_{\text{воспр}} \sqrt{\frac{c_2}{m}}, \quad (13)$$

где $c_1 = \frac{(2 + 2^n \times n)}{(n-1)^2 \times 2^{n+1}} = \frac{5}{4}$; $c_2 = \frac{[n(n-3)+3]2^n + 2}{(n-1)^2 \times 2^{n+1}} = \frac{3}{4}$.

Среднеквадратические отклонения b_j коэффициентов находили по выражениям (10)–(13). Расчетные значения критериев Стьюдента для коэффициентов регрессий (2) и (3) приведены ниже:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{S_{b0}} = \frac{0,4413}{0,00827} = 53,36; \quad t_{11} = \frac{|b_{11}|}{S_{b11}} = \frac{0,0183}{0,0064} = 2,86;$$

$$t_{12} = \frac{|b_{12}|}{S_{b12}} = \frac{0,0078}{0,00369} = 2,11; \quad t_1 = \frac{|b_1|}{S_{b1}} = \frac{0,0552}{0,003} = 18,4;$$

$$t_2 = \frac{|b_2|}{S_{b2}} = \frac{0,0038}{0,003} = 1,26; \quad t_{22} = \frac{|b_{22}|}{S_{b22}} = \frac{0,0183}{0,0064} = 2,86.$$

$$t_0^* = \frac{|b_0^*|}{S_{b0}^*} = \frac{0,913}{0,0187} = 48,8; \quad t_1^* = \frac{|b_1^*|}{S_{b1}^*} = \frac{0,102}{0,0068} = 15;$$

$$t_2^* = \frac{|b_2^*|}{S_{b2}^*} = \frac{0,0058}{0,0068} = 0,85; \quad t_{11}^* = \frac{|b_{11}^*|}{S_{b11}^*} = \frac{0,031}{0,014} = 2,2;$$

$$t_{22}^* = \frac{|b_{22}^*|}{S_{b22}^*} = \frac{0,0285}{0,014} = 2,1; \quad t_{12}^* = \frac{|b_{12}^*|}{S_{b12}^*} = \frac{0,008}{0,00838} = 0,96;$$

Табличное значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы $f = N(m - 1) = 9 \times 2 = 18$ и уровня значимости $\alpha = 0,05$ равно 2,101.

Все коэффициенты, для которых расчетное значение критерия Стьюдента меньше, чем табличное значение этого критерия, исключаем из уравнений (2) и (3) и получаем:

$$Y = 0,4413 + 0,0552x_1 - 0,0183x_1^2 - 0,0183x_2^2 + 0,0078x_1x_2, \quad (14)$$

$$Y^* = 0,913 + 0,102x_1 - 0,031x_1^2 - 0,0285x_2^2. \quad (15)$$

Адекватность уравнений (14) и (15) оценивали по критерию Фишера. Для этого определяли остаточную дисперсию $S_{\text{ост}}^2$ по формуле

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^P - \bar{y}_i)^2}{N - l},$$

где y_i^P – расчетное значение функции отклика (коэффициента пропитки) по формуле (14) или (15) в каждой i -й точке плана; l – число значимых коэффициентов в уравнении (14) или (15). Величины остаточных дисперсий были равны $S_{\text{ост}}^2 = 0,0000332$ и $S_{\text{ост}}^{*2} = 0,00027284$ соответственно. Расчетные значения критерия Фишера определялись по формуле

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\text{воспр}}^2} \quad \text{и были равны соответственно } F = 0,205$$

и $F^* = 0,324$. Табличное значение критерия Фишера для уровня значимости $\alpha = 0,5$ и степеней свободы $f_1 = N - l, f_2 = N(m - 1)$ равны соответственно $F_{\alpha}(f_1 = 4, f_2 = 18) = 2,77; F_{\alpha}(f_1 = 5, f_2 = 18) = 2,93$. Так как в обоих случаях расчетные значения критерия Фишера меньше табличных, то уравнения (14) и (15) адекватно описывают эксперимент.

Обсуждение результатов

Таким образом, в результате проделанной работы было установлено, что предлагаемая технология пропитки обмоток статоров электродвигателей смесью компаунда КП-34 с ультрадисперсным магнитномягким никель-цинковым наполнителем марки 400НН имеет существенные преимущества по сравнению с типовой пропиткой чистым компаундом КП-34. Это преимущество заключается в том, что основной показатель качества – коэффициент пропитки обмоток $K_{\text{пр}}^*$ по предлагаемой технологии – почти в 2 раза превышает коэффициент пропитки $K_{\text{пр}}$, достигаемый при типовой пропитке. Это обусловлено тем, что при подаче на обмотку сразу после пропитки греющего тока компаунд из обмоток, пропитанных по тепловой технологии, разогревается, вязкость его снижается, и он интенсивно начинает вытекать из обмотки. При подаче же на обмотки,

пропитанные смесью ультрадисперсного никель-цинкового порошка, такого же по величине греющего тока происходит определенная ориентация частиц указанного магнитного ультрадисперсного порошка, и они перекрывают межвитковые полости в обмотке, тем самым препятствуя вытеканию пропиточного состава из неё.

Заключение

В результате проведенных опытов были получены адекватные уравнения, связывающие коэффициент пропитки с величиной напряжения подогрева и дозой пропиточного состава, подаваемого на лобовые части обмотки. Как следует из уравнений (14) и (15), наиболее сильное влияние на коэффициенты пропитки оказывает доза пропиточного состава, тогда как напряжение предварительного подогрева обмоток оказывает менее заметное влияние. Наилучший результат, как это следует из табл. 2, был получен при дозе пропиточного состава $V = 103$ мл и $U = 41$ В в опыте 6. При указанных сочетаниях параметров коэффициент пропитки смесью компаунда КП-34 с ультрадисперсным никель-цинковым порошком был более чем в 2 раза выше коэффициента пропитки компаундом КП-34. Предлагаемый способ пропитки компаундом КП-34 с ультрадисперсным никель-цинковым порошком может быть использован для любых намоточных изделий, применяемых в электротехнике и радиоэлектронике: в трансформаторах, микродвигателях, сельсинах, индуктивных элементах.

Литература

1. Смирнов Г.В. Применение магнитодиэлектрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, З.Г. Бикбаева // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 11. – С. 106–117.
2. Смирнов Г.В. Тепловые свойства магнитодиэлектрических композиционных составов на основе компаунда КП-34 и ультрадисперсного никель-цинкового порошка / Г.В. Смирнов, Л.О. Хасанов, В.В. Полисадова, М.С. Пе-

тюкевич, С.А. Понамарева // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 6/2. – С. 291–296.

3. Пат. 2568144 РФ, МПК G 01 N 27 /00. Способ контроля качества пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов (РФ), Д.Г. Смирнов (РФ). – № 2014108633/28; заявл. 05.03.14; опубл. 10.11.15, Бюл. № 31. – 15 с.

4. Смирнов Г.В. Электропропитка обмоток электротехнических изделий // Г.В. Смирнов, С.А. Волков // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2004. – № 2(10). – С. 107–111.

5. Магнитодиэлектрический компаунд с добавками ультрадисперсного порошка Zn-Ni для улучшения свойств обмоток электрических изделий / Г.В. Смирнов, Л.О. Хасанов, Д.Г. Смирнов и др. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 6/2. – С. 296–301.

Смирнов Геннадий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор,
директор НИИ электронной технологической аппаратуры
и систем связи (НИИ ЭТОСС) ТУСУРа
Тел.: +7-913-829-44-47
Эл. почта: Smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич

Канд. техн. наук, инженер НИИ ЭТОСС
Тел.: +7-952-182-81-25
Эл. почта: Smirnov@main.tusur.ru

Smirnov G.V., Smirnov D.G.

Impregnation of electrical machine windings with magnetodisc parametric composite containing ultrafine nickel-zinc filler

The results of the study on impregnation of the windings with a compound containing ultrafine Nickel-zinc filler are described. A comparative analysis of the quality of traditional impregnating compound KP-34, with the impregnating compound KP-34 with Nickel-zinc ultrafine filler is carried out. The assessment of the quality of the impregnation was performed by the impregnation ratio showing the degree of saturation of the cavities winding with impregnating composition. A complete factorial experiment was used.

Keywords: ultradispersed powders, magnetic composite, impregnating, winding, thermal conductivity, coefficient of impregnation.