

УДК 621.315.62

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ И ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЯХ

Смирнов Геннадий Васильевич,  
smirnov@main.tusur.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.

**Актуальность** работы связана с тем, что в настоящее время технологические процессы разведки, добычи, транспортировки георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности подвержены высокому уровню механизации и автоматизации с участием электрических машин. Надежность и безотказность работы этих машин зависят от состояния витковой изоляции, роль которой играет изоляция обмоток электродвигателей. Показатели надежности этого элемента обмоток закладываются в процессе их производства. При этом существенный вклад в упомянутые показатели вносит технологическая операция пропитки. От того, насколько качественно проведена данная операция, зависит вероятность скрытия дефектов в изоляции обмоток, тепловые свойства электродвигателей, влагостойкость и монолитность обмоток. Поэтому совершенствование процесса пропитки и повышение её эффективности являются весьма злободневными.

**Цель:** создать математическую модель технологической операции пропитки с применением электростатической зарядки струи пропиточного состава и показать, что добиться снижения уровня индуцированного напряжения, используемого для электростатической зарядки струи пропиточного состава, можно путем усиления электрического поля в области сопла, из которого осуществляется полив лобовых частей обмотки пропиточным составом, за счет придания соплу определенной формы.

**Методы.** При создании математической модели применялись классические методы решения дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные поля, и экспериментальные исследования, позволившие установить адекватность созданной модели.

**Результаты.** Приведены результаты моделирования и исследований новой технологии пропитки обмоток электрических машин электростатически заряженной струей пропиточного состава. Создана математическая модель, связывающая коэффициент усиления поля на вершине эллипсоидного сопла с его геометрическими параметрами. Проведена экспериментальная проверка полученной модели, и показана адекватность модели экспериментальным результатам. Представлены данные практического применения полученной модели на заводских установках, показывающие реальную возможность снижения уровня напряжения на сопле и эффективности предлагаемой пропитки обмоток. Показаны преимущества предлагаемой технологии в сравнении с типовыми технологиями пропитки на основе данных, полученных в реальном производстве. Предлагаемая технология позволит существенно снизить вероятность заводского брака из-за витковых замыканий в обмотке, повысить показатели безотказности выпускаемых электродвигателей в процессе приработки и эксплуатации.

### Ключевые слова:

Обмотка, система управления, автоматизация, пропитка, состав, струйный способ пропитки, напряженность электрического поля, электростатическая зарядка пропиточного состава, индукционный способ зарядки частиц, качество пропитки, эллипсоид, напряжение, изоляция.

### Введение

Пропитка обмоток – многоцелевая технологическая операция, призванная скрыть дефекты в корпусной и витковой изоляции, снизить пооперационные технологические отказы обмоток и в целом повысить надежность изделий [1]. Пропитка обмоток электродвигателей приводит к одновременному изменению тепловых, влагозащитных и электроизоляционных свойств обмоток.

При традиционных технологиях пропитки (струйно-капельная или с применением вакуума и давления) наблюдается относительно невысокая степень «залечивания» дефектов, снижающаяся с возрастанием протяженности дефектов. В пленке пропиточного состава, скрывающей дефекты, в процессе эксплуатации электрической машины проявляется повышенная скорость дефектообразования. Оба упомянутых фактора приводят к падению качественных показателей обмоток и снижению их срока службы [2–23].

Весьма актуальной задачей является повышение показателей надежности всех электродвигателей, но чрезвычайно ответственной задачей является повышение надежности и безотказности электродвигателей, работающих в наиболее ответственных отраслях, таких как нефтедобывающая, угольная и горнодобывающая промышленность. Это связано с тем, что отказ электроприводов, работающих в упомянутых отраслях, не только приводит к огромным экономическим потерям, но может вызвать гибель людей.

Разработанная нами технология пропитки обмоток электростатически заряженной струей пропиточного состава не только изменяет условия проникновения пропиточного состава в обмотку, но и приводит к модификации пропиточного состава, вызывающей изменения его физико-химических свойств [24]. Сущность предложенной технологии пропитки заключается в том, что частицы струи пропиточного состава в процессе пропитки электростатически заряжаются

индукционным способом [25, 26]. Механизм индукционного способа электростатической зарядки частиц включает в себя поляризацию частицы в электрическом поле и нейтрализацию одного из зарядов. Это происходит не только при контакте с электродом, но и в сильном электрическом поле. Одним из условий эффективной электростатической зарядки частиц пропиточного состава является необходимость создания в области протекания частиц пропиточного состава и напряженности электрического поля не ниже 10 кВ/см [27]. Для обеспечения такой напряженности в однородном электрическом поле при расстояниях в несколько сантиметров требуется подать на сопло, через которое проходят частицы пропиточного состава, напряжение в несколько кВ, что существенно усложняет процесс пропитки. Для того чтобы снизить потенциал, необходимый для эффективной электростатической зарядки частиц, нужно повысить напряженность электрического поля в области электростатической зарядки.

#### Расчет коэффициента усиления напряженности в резко неоднородном поле

Одной из возможностей повышения напряженности является путь создания резко неоднородного поля.

Найдем коэффициент усиления поля на вершине выступа, считая, что он имеет форму эллипсоида вращения. Для нахождения коэффициента усиления поля необходимо решить уравнение Лапласа. В рассматриваемом случае это уравнение удобнее решать в эллиптических координатах. Связь эллиптических координат с декартовыми задается формулами [28]

$$\begin{cases} x = a\sqrt{(\sigma^2 - 1)(1 - \vartheta^2)}\cos\varphi; \\ y = a\sqrt{(\sigma^2 - 1)(1 - \vartheta^2)}\sin\varphi; \\ z = a\sigma\vartheta, \end{cases} \quad (1)$$

где  $2a$  – расстояние между фокусами эллипсоида вращения;  $\sigma, \vartheta, \varphi$  – эллиптические координаты, причем  $\sigma \geq 1, 0 \leq \vartheta \leq 1, 0 \leq \varphi \leq \pi$ .

С учетом связи декартовых и эллиптических координат (1) и симметрии поля относительно координаты  $\varphi$  уравнение Лапласа запишется в виде

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ (\sigma^2 - 1) \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[ (1 - \vartheta^2) \frac{\partial U}{\partial \vartheta} \right] = 0. \quad (2)$$

Граничные условия:  $U|_{\vartheta=0} = 0$  – потенциал у основания эллипсоида вращения;  $U|_{\sigma=\sigma_0} = 0$  – потенциал на вершине эллипсоида;  $\frac{\partial U}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\infty} = E_0 \frac{\partial z}{\partial \sigma}$  – напряженность электрического поля на бесконечности.

Указанные граничные условия и связь эллиптических координат с декартовыми координатами демонстрирует рис. 1.

Решение уравнения (2) будем искать в виде произведения двух функций, одна из которых зависит от  $\sigma$ , а другая – от  $\vartheta$ .

$$U = f_1(\sigma)f_2(\vartheta). \quad (3)$$

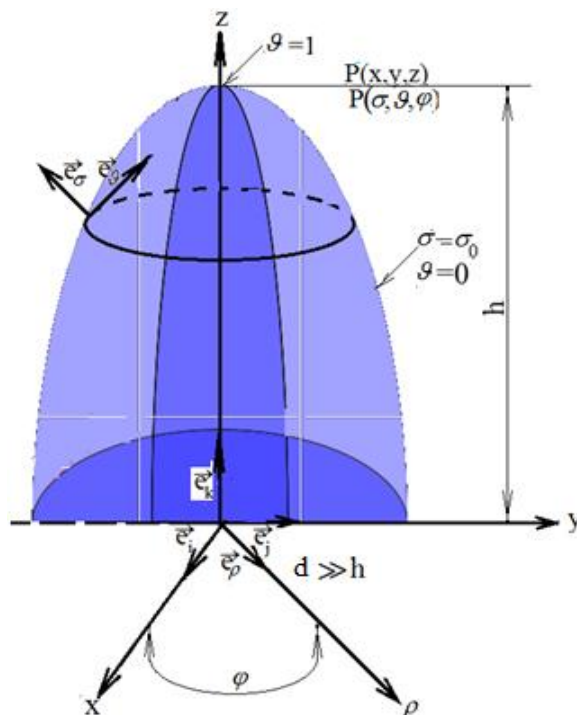


Рис. 1. Эллиптическая система координат

Fig. 1. Elliptical coordinate system

Для функций  $f_1(\sigma)$  и  $f_2(\vartheta)$  граничные условия переписываются в виде:

$$f_1(\sigma)|_{\sigma=\sigma_0} = 0; \quad (4)$$

$$f_2(\vartheta)|_{\vartheta=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\infty} = E_0 \frac{\partial z}{\partial \sigma}, \quad (6)$$

где  $E_0$  – макронапряженность поля в промежутке.

Подставив (3) в (2), получим

$$f_2(\vartheta) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ (\sigma^2 - 1) \frac{\partial f_1(\sigma)}{\partial \sigma} \right] + f_1(\sigma) \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[ (1 - \vartheta^2) \frac{\partial f_2(\vartheta)}{\partial \vartheta} \right] = 0. \quad (7)$$

Перепишем выражение (7) в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{f_1(\sigma)} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ (\sigma^2 - 1) \frac{\partial f_1(\sigma)}{\partial \sigma} \right] = \\ & = - \frac{1}{f_2(\vartheta)} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[ (1 - \vartheta^2) \frac{\partial f_2(\vartheta)}{\partial \vartheta} \right] = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Производные по разным координатам в выражении (8) равны, что может быть справедливым лишь при условии равенства левой и правой частей выражения постоянному числу. Обозначим его  $\lambda$ .

$$\frac{1}{f_1(\sigma)} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ (\sigma^2 - 1) \frac{\partial f_1(\sigma)}{\partial \sigma} \right] = \lambda; \quad (9)$$

$$- \frac{1}{f_2(\vartheta)} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[ (1 - \vartheta^2) \frac{\partial f_2(\vartheta)}{\partial \vartheta} \right] = \lambda. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) можно записать в виде

$$(\sigma^2 - 1) \frac{\partial^2 f_1(\sigma)}{\partial \sigma^2} + 2\sigma \frac{\partial f_1(\sigma)}{\partial \sigma} - \lambda f_1(\sigma) = 0, \quad (11)$$

$$(1 - g^2) \frac{\partial^2 f_2(g)}{\partial g^2} - 2g \frac{\partial f_2(g)}{\partial g} + \lambda f_2(g) = 0. \quad (12)$$

Решением уравнения (12) будут полиномы Лежандра, если  $\lambda = n(n+1)$  [28].

Полиномы Лежандра первого рода имеют вид

$$P(g) = \frac{1}{2^n n!} \frac{\partial^n}{\partial g^n} (g^2 - 1)^n. \quad (13)$$

Как следует из выражения (13), все четные полиномы Лежандра имеют свободный член, поэтому с учетом граничного условия (5) они не могут быть решением уравнения (12). Таким образом, уравнению (12) удовлетворяют только полиномы Лежандра, имеющие степень  $n = 2m + 1$ . С учетом этого уравнение (11) можно записать как

$$(\sigma^2 - 1) \frac{\partial^2 f_1(\sigma)}{\partial \sigma^2} + 2\sigma \frac{\partial f_1(\sigma)}{\partial \sigma} - (n+1)nf_1(\sigma) = 0; \quad \sigma \geq 1, n = 2m + 1. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) будем искать в виде двух нелинейных функций

$$f_1(\sigma) = C_1 P_n(\sigma) + C_2 Q_n(\sigma), \quad n = 2m + 1, \quad (15)$$

где  $P_n(\sigma)$  – нечетные полиномы Лежандра;  $Q_n(\sigma)$  – функция, дающая нелинейные комбинации с полиномом Лежандра, равная  $\sigma \operatorname{argch} \sigma - 1$ ;  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования. Воспользовавшись граничным условием (4), получим из выражения (15)

$$C_2 = -\frac{C_1 P_n(\sigma_0)}{Q_n(\sigma_0)}, \quad n = 2m + 1. \quad (16)$$

Подставив (16) в (15), получим

$$f_1(\sigma) = U(\sigma, g). \quad (17)$$

Функция  $U(\sigma, g)$  (17) находится в виде суммы ряда

$$U(\sigma, g) = \sum_{m=0}^{\infty} C_m P_{2m+1}(g) \times \left[ P_{2m+1}(\sigma) \frac{P_{2m+1}(\sigma_0)}{Q_{2m+1}(\sigma_0)} Q_{2m+1}(\sigma) \right]. \quad (18)$$

Воспользовавшись граничным условием (6), получим

$$\frac{\partial U(\sigma, g)}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\infty} = E_0 \frac{\partial z}{\partial \sigma} = a g E_0, \quad (19)$$

для чего найдем частную производную от функции (18)

$$\frac{\partial U(\sigma, g)}{\partial \sigma} = \sum_{m=0}^{\infty} C_m P_{2m+1}(g) \times \left[ \frac{\partial P_{2m+1}(\sigma)}{\partial \sigma} - \frac{P_{2m+1}(\sigma_0)}{Q_{2m+1}(\sigma_0)} Q_{2m+1}(\sigma) \right]. \quad (20)$$

При всех значениях  $m$ , кроме  $m=0$ , ряд (20) с  $\sigma=\infty$  будет превращаться в  $\infty$ , поэтому в выражении (19) отбрасываем все члены ряда, кроме  $m=0$

$$\frac{\partial U(\sigma, g)}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\infty} = E_0 \frac{\partial z}{\partial \sigma} = E_0 a g = C_0 P_1(g) \left[ 1 - \frac{P_1(\sigma_0)}{Q_1(\sigma_0)} \frac{\partial Q_1(\sigma)}{\partial \sigma} (\sigma=\infty) \right]. \quad (21)$$

Из выражения (21) получим

$$C_0 = P \frac{E_0 a g}{P_1(g) \left[ 1 - \frac{P_1(\sigma_0)}{Q_1(\sigma_0)} \frac{\partial Q_1(\sigma)}{\partial \sigma} (\sigma=\infty) \right]}. \quad (22)$$

С учетом найденных коэффициентов (22) функция  $U(\sigma, g)$  запишется в виде

$$U(\sigma, g) = \frac{E_0 a g \times P_1(g)}{P_1(g) \left[ 1 - \frac{P_1(\sigma_0)}{Q_1(\sigma_0)} \frac{\partial Q_1(\sigma)}{\partial \sigma} (\sigma=\infty) \right]} \times \left[ P_1(\sigma) - \frac{P_1(\sigma_0)}{Q_1(\sigma_0)} Q_1(\sigma) \right], \quad (23)$$

где

$$Q_1(\sigma) = \sigma \operatorname{argch} \sigma - 1; \quad \frac{\partial Q_1(\sigma)}{\partial \sigma} = \frac{\sigma}{\sigma^2 - 1} + \operatorname{argch} \sigma; \quad \frac{\partial Q_1(\sigma)}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\infty} = 0.$$

Следовательно, потенциал в промежутке, с учетом выражения (23) описывается формулой

$$U(\sigma, g) = E_0 a g \sigma \left( 1 - \frac{\operatorname{argch} \sigma - \frac{1}{\sigma}}{\operatorname{argch} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}} \right). \quad (24)$$

Вводя единичные векторы  $\vec{e}_\sigma, \vec{e}_g, \vec{e}_\varphi$ , найдем напряженность поля

$$\vec{E} = \operatorname{grad} U = E_\sigma \vec{e}_\sigma + E_g \vec{e}_g + E_\varphi \vec{e}_\varphi, \quad (25)$$

где  $E_\sigma, E_g, E_\varphi$  – проекции вектора напряженности на оси эллиптических координат;  $E_\varphi = 0$  – вследствие симметрии поля. Значения  $E_\sigma, E_g$  в (25) находятся по формулам

$$E_\sigma = \frac{1}{H_1} \frac{\partial U(\sigma, g)}{\partial \sigma}; \quad E_g = \frac{1}{H_2} \frac{\partial U(\sigma, g)}{\partial g}, \quad (26)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – коэффициенты Ламе, в выражении (26) определяются по выражениям (27) и (28)

$$H_1 = \sqrt{\left( \frac{\partial x}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \sigma} \right)^2} = \sqrt{\frac{a^2 \sigma^2 (1 - g^2)^2}{(\sigma^2 - 1)(1 - g^2)} + a^2 \sigma^2} = a \sqrt{\frac{\sigma^2 - g^2}{\sigma^2 - 1}}, \quad (27)$$

$$H_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \vartheta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \vartheta}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \vartheta}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{a^2 \sigma^2 (\sigma^2 - 1)^2}{(\sigma^2 - 1)(1 - \vartheta^2)} + a^2 \sigma^2} = a \sqrt{\frac{\sigma^2 - \vartheta^2}{1 - \vartheta^2}}. \quad (28)$$

Производная  $\frac{\partial U(\sigma, \vartheta)}{\partial \sigma}$  из выражения (24), равняется

$$\frac{\partial U(\sigma, \vartheta)}{\partial \sigma} = E_0 a \vartheta \left[ 1 - \frac{\arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{1}{\sigma}}{\arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}} \right] -$$

$$- E_0 a \sigma \vartheta \left[ - \frac{1}{(\sigma^2 - 1) \left( \arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0} \right)} - \frac{1}{\sigma^2} \right] \times$$

$$\times E_0 a \vartheta \left[ 1 - \frac{\arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{1}{\sigma}}{\arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}} \right].$$

Производная  $\frac{\partial U(\sigma, \vartheta)}{\partial \vartheta}$  в выражениях (26) будет определяться как

$$\frac{\partial U(\sigma, \vartheta)}{\partial \vartheta} = E_0 a \vartheta \left[ 1 - \frac{\arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{1}{\sigma}}{\arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}} \right], \quad (29)$$

$$E_\sigma = \frac{1}{H_1} \frac{\partial U(\sigma, \vartheta)}{\partial \sigma} = E_0 \vartheta \sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\sigma^2 - \vartheta^2}} \times$$

$$\times \left[ 1 - \frac{\arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{1}{\sigma}}{\arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}} \right], \quad (30)$$

$$E_\vartheta = \frac{1}{H_2} \frac{\partial U(\sigma, \vartheta)}{\partial \vartheta} =$$

$$= E_0 \sigma \sqrt{\frac{1 - \vartheta^2}{\sigma^2 - \vartheta^2}} \left[ 1 - \frac{\arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{1}{\sigma}}{\arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}} \right]. \quad (31)$$

Для большего удобства полученные выражения (29)–(31) переведем в физическую (цилиндрическую) систему координат. Базисы физических координат выражаются через базисы эллиптических координат следующей формулой

$$\vec{j}_i = \frac{1}{H_{ii}} \vec{e}_j, \quad (32)$$

где  $\vec{j}_i$  – базисы физических координат;  $H_{ii}$  – коэффициенты Ламэ [28];  $\vec{e}_j$  – базисы эллиптических координат. С учётом выражения (32) можно записать

$$\vec{e}_\sigma = \frac{1}{H_\sigma} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \vec{e}_\rho + \frac{1}{H_\sigma} \frac{\partial z}{\partial \sigma} \vec{e}_z. \quad (33)$$

Заметим, что  $\frac{1}{H_{ii}} \frac{\partial x}{\partial x_i}$ ;  $\frac{1}{H_{ii}} \frac{\partial y}{\partial x_i}$ ;  $\frac{1}{H_{ii}} \frac{\partial z}{\partial x_i}$  в выражении (33) являются направляющими косинусами орта  $\vec{i}\vec{j}$  (т. е.  $i$ -й координатной линии) по отношению к осям X, Y, Z.

$$\rho = \sqrt{(1 - \vartheta^2)} = a \sqrt{(\sigma^2 - 1)(1 - \vartheta^2)}, \quad (34)$$

$$z = a \sigma \vartheta. \quad (35)$$

$$H_\sigma = a \sqrt{\frac{\sigma^2 - \vartheta^2}{\sigma^2 - 1}}, \quad H_\vartheta = a \sqrt{\frac{\sigma^2 - \vartheta^2}{1 - \vartheta^2}}, \quad (36)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} = -a \vartheta \sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{1 - \vartheta^2}}; \quad \frac{\partial z}{\partial \sigma} = a \vartheta, \quad (37)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \sigma} = a \sqrt{\frac{1 - \vartheta^2}{\sigma^2 - 1}}; \quad \frac{\partial z}{\partial \vartheta} = a \sigma. \quad (38)$$

Воспользовавшись выражениями (34)–(38) и подставив их в формулу (33), получим

$$\vec{e}_\sigma = \sigma \sqrt{\frac{1 - \vartheta^2}{\sigma^2 - \vartheta^2}} \vec{e}_\rho + \vartheta \sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\sigma^2 - \vartheta^2}} \vec{e}_z; \quad (39)$$

$$\vec{e}_\vartheta = \vartheta \sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\sigma^2 - \vartheta^2}} \vec{e}_\rho + \sigma \sqrt{\frac{1 - \vartheta^2}{\sigma^2 - \vartheta^2}} \vec{e}_z. \quad (40)$$

Напряженность электрического поля  $\vec{E}$  через проекции эллиптической системы координат с учетом выражений (39) и (40), запишется, в виде

$$\vec{E} = E_\sigma \vec{e}_\sigma + E_\vartheta \vec{e}_\vartheta = - \frac{E_0 \vartheta}{(\sigma^2 - \vartheta^2) \chi(\sigma_0)} \sqrt{\frac{\vartheta^2 - 1}{\sigma^2 - 1}} \vec{e}_\rho -$$

$$- E_0 \left[ 1 - \frac{1}{\chi(\sigma_0)} \left( \arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{\sigma}{\sigma^2 - \vartheta^2} \right) \right] \vec{e}_z. \quad (41)$$

Таким образом, проекции напряженности электрического поля  $\vec{E}$  на оси физических координат  $\rho$  и  $z$  на основе выражения (41) будут

$$E_z = E_0 \left[ 1 - \frac{1}{\chi(\sigma_0)} \left( \arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{\sigma}{\sigma^2 - \vartheta^2} \right) \right], \quad (42)$$

$$E_\rho = - \frac{E_0 \vartheta}{(\sigma^2 - \vartheta^2) \chi(\sigma_0)} \sqrt{\frac{\vartheta^2 - 1}{\sigma^2 - 1}}. \quad (43)$$

На вершине эллиптического выступа, т. е. при  $\sigma = \sigma_0$ , уравнение (43) обращается в нуль при  $E_\theta(\sigma = \sigma_0) = 0$ ,  $E = E_\sigma(\sigma = \sigma_0)$ . Подставим значение  $\sigma = \sigma_0$  в уравнение (42) получим

$$E = E_\sigma e_\sigma = -E_0 g \sqrt{\frac{\sigma^2 - 1}{\sigma^2 - g^2}} \times \left( 1 - \frac{\arg \operatorname{cth} \sigma - \frac{1}{\sigma_0} - \frac{\sigma_0}{\sigma_0^2 - 1}}{\arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}} \right) e_\rho = -\frac{E_0 g}{\chi(\sigma_0)} \frac{1}{\sqrt{(\sigma_0^2 - 1)(\sigma_0^2 - g^2)}} e_\sigma, \quad (44)$$

где  $\chi(\sigma_0) = \arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0}$ . Таким образом, поле на вершине выступа равно

$$\vec{E} = -\frac{E_0 g}{\chi(\sigma_0)} \frac{1}{\sqrt{(\sigma_0^2 - 1)(\sigma_0^2 - g^2)}} e_\sigma.$$

Радиус  $R$  основания полуэллипсоида вращения равен

$$R = a \sqrt{\sigma_0^2 - 1}. \quad (45)$$

Высота полуэллипсоида вращения равна

$$h = a \sigma_0. \quad (46)$$

Обозначим отношение высоты полуэллипсоида к радиусу основания

$$\lambda = \frac{h}{R}. \quad (47)$$

Выразим  $\sigma$  через  $\lambda$ . Подставим выражения (45) и (46) в (47) и возведем в квадрат правую и левую части полученного выражения

$$\lambda^2 = \frac{h^2}{R^2} = \frac{a^2 \sigma_0^2}{a^2 (\sigma_0^2 - 1)} = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^2 - 1)}. \quad (48)$$

Из выражения (48) получим

$$\sigma_0 = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}}. \quad (49)$$

Выразим  $\chi(\sigma_0)$  через  $\lambda$ , для этого воспользуемся формулами (50) и (51)

$$\arg \operatorname{cth} x = \frac{1}{2} \ln \frac{x+1}{x-1}, \quad |x| > 1. \quad (50)$$

$$\chi(\sigma_0) = \arg \operatorname{cth} \sigma_0 - \frac{1}{\sigma_0} = \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma_0 + 1}{\sigma_0 - 1} - \frac{1}{\sigma_0}. \quad (51)$$

Подставим в выражение (51) значение  $\sigma_0$  из (49), получим

$$\chi(\lambda) = \frac{1}{2} \ln \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1}} - \frac{\sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda}. \quad (52)$$

Подставив значение  $\sigma_0$  из (49) и  $\chi(\lambda)$  из выражения (52) в выражение (44), получим

$$\vec{E} = -\frac{E_0 g}{\lambda \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1}} - \frac{\sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda} \right]} \times \frac{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^3}}{\sqrt{(\lambda^2 - g^2)(\lambda^2 - 1)}} e_\sigma. \quad (53)$$

Обозначим

$$\beta(\lambda) = \frac{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^3}}{\left[ \frac{1}{2} \lambda \ln \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1}} - \sqrt{\lambda^2 - 1} \right]}. \quad (54)$$

С учетом введенного обозначения (54) выражение (53) перепишем в виде

$$\vec{E} = -\frac{E_0 \beta(\lambda) g}{\sqrt{\lambda^2 - g^2 (\lambda^2 - 1)}} e_\sigma. \quad (55)$$

На вершине выступа  $g = 1$  поле принимает максимальное значение. Орт ( $e_\sigma$ ) примет вид

$$\vec{e}_\sigma = \sigma_0 \times 0 + \vec{e}_z. \quad (56)$$

выражение (55) с учетом (56) на выступе при  $\theta = 1$  примет вид

$$\vec{E}_{\max(g=1)} = -\frac{E_0 \beta(\lambda) g}{\sqrt{(\lambda^2 - \lambda^2 - 1)}} e_z = E_0 \beta(\lambda) g e_z, \quad (57)$$

где  $\beta(\lambda)$  – коэффициент усиления поля на выступе. Выразим  $\beta(\lambda)$  через  $\lambda$ . Для этого распишем выражение

$$\frac{1}{2} \ln \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1}} = \frac{1}{2} \lambda \ln \frac{[\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}]^2}{\lambda - (\lambda^2 - 1)} = \ln \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}. \quad (58)$$

Подставив выражение (58) в (54), получим

$$\beta(\lambda) = \frac{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^3}}{\left[ \lambda \ln[\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}] - \sqrt{\lambda^2 - 1} \right]}. \quad (59)$$

Таким образом, напряженность электрического поля на вершине эллиптического выступа с учетом формул (57) и (59) будет определяться выражением

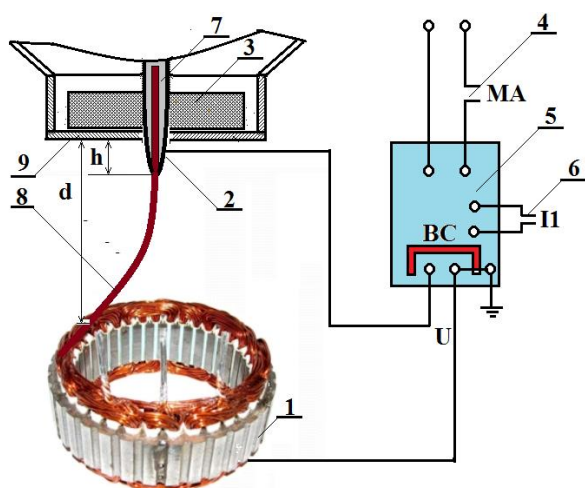
$$E_{\max(g=1)} = -E_0 \frac{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^3}}{\left[ \lambda \ln[\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}] - \sqrt{\lambda^2 - 1} \right]}.$$

### Практическая реализация

Реальные испытания предлагаемой технологии проводились на заводе «Киргизэлектродвигатель» в г. Бишкеке и на НПО «Заря» в г. Санкт-Петербурге на заводской установке пропитки статоров (УПС-1),

схематически изображённой на рис. 2. В дозирующее устройство УПС-1 дополнительно были введены диэлектрические трубки – 7 для подвода пропиточного состава к соплу – 2. Сопло – 2 было закреплено на плоском металлическом держателе – 9, установленном под проходным изолятором – 3, что позволило изолировать трубки от корпуса установки. При проведении экспериментов расстояние между плоскостью электрода – 9, на котором размещалось сопло – 2, до лобовой части обмотки статора – 1 было равно  $d=10$  см. Сопло было выполнено в виде цилиндрической трубки диаметром с  $D=2R=2$  мм, высота которой  $h$  в процессе эксперимента изменялась. Внутренний канал трубки был равен 1 мм. Конец трубки сопла был скруглён. Такая форма сопла была близкой к эллипсоиду вращения.

В установке УПС-1 переменное напряжение 50 Гц с помощью преобразователя, в качестве которого используется диодный мост, преобразовывалось в постоянное напряжение.



**Рис. 2.** Схема модернизированной установки пропитки статоров (УПС-1): 1 – статор; 2 – сопло в виде эллипсоида; 3 – проходной изолятор; 4 – магнитный пускатель (МА); 5 – источник высокого напряжения (ВС); 6 – контактное реле (II); 7 – диэлектрические трубки; 8 – струя пропиточного состава; 9 – держатель сопла

**Fig. 2.** Scheme of the upgraded installation of impregnation of stators (UPS-1): 1 – stator; 2 – ellipsoid nozzle; 3 – pass-through insulator; 4 – magnetic starter (MA); 5 – high voltage source (HV); 6 – contact relay (II); 7 – dielectric tubes; 8 – impregnating composition jet; 9 – nozzle holder

При малой напряженности поля образование электростатически заряженной струи пропиточного состава не происходит, так как электрическая сила недостаточна для того, чтобы преодолеть силу поверхностного натяжения. От сопла отрываются крупные капли под действием своего веса. Для преодоления сил поверхностного натяжения, как это следует из работы [29], необходимо создать такие условия у кромки сопла, чтобы напряженность в этой области  $E_{\max}(9) \geq 10$  кВ/см.

Иными словами, для эффективной электростатической зарядки частиц пропиточного состава необходимо обеспечить напряженность в области вершины сопла не менее 10 кВ/см. Примем величину  $E_{\max}(9)=10$  кВ/см в качестве минимальной величины, которую следует обеспечить для реализации эффективной пропитки, и оценим, при каких условиях её можно обеспечить.

В таблице приведены расчетные значения коэффициентов усиления поля и индукционного напряжения при  $E_{и}=10$  кВ/см различных значениях  $\lambda$ .

**Таблица.** Значения коэффициента усиления поля  $\beta(\lambda)$  при значениях  $\lambda$

**Table.** Values of the field gain  $\beta(\lambda)$  at values  $\lambda$

$\lambda$	5	6	8	9	10
$\beta(\lambda)$	17,9	23	35,2	42	49,3
$U$ , кВ	5,58	4,34	2,84	2,28	2,02

В реальной установке было изготовлено сопло, высота которого  $h=10$  мм, а радиус основания был равен  $R=1$  мм, что соответствовало коэффициенту  $\beta(\lambda)=10$ . На сопло в процессе испытаний предлагаемой технологии от источника высокого напряжения, в качестве которого использовалась пробивная универсальная установка УПУ-10, подавалось постоянное напряжение, равное 2 кВ. При данном напряжении частицы пропиточного состава эффективно заряжались, что подтверждало правильность проведенных расчетов. Напряжение питания от источника подавалось через контакты магнитного пускателя (МА) только в автоматическом режиме. Напряжение отключалось во время открывания щитка, в котором размещался высоковольтный источник. Максимальный ток ВС – 5 мА (безопасен для человека).

Заряженные частицы пропиточного состава, проникшие в полость обмотки при пропитке, индуцируют на эмалевой изоляции заряд противоположного знака. Их взаимодействие приводит к плотному прилеганию струи пропиточного состава к изоляции проводников обмотки. В области дефектных участков изоляции электрическое поле искажено, что усиливает проникновение в эти участки лака. Адгезионные силы при этом усиливаются, что и приводит к равномерному закрытию дефектов пропиточным составом. Изменение тепловых свойств, влагостойкости и времени сушки происходит, на наш взгляд, за счет более тонких структурных изменений внутри компаунда. Реальные заводские испытания проводились на статорах АИРП80А6. Количество статоров, пропитанных по традиционной технологии, было равно 621, а по предложенной технологии – 1100 штук. Пропитанные обмотки статоров после сборки были подвергнуты контрольным испытаниям. В результате испытаний процент отбракованных статоров с использованием предлагаемой технологии составил 6 %, в том числе из-за витковых замыканий – 0,8 %, тогда как при использовании типовой технологии процент брака составил 10,1 %, в том числе из-за витковых замыканий – 1,5 %. Как показали проведенные испытания, предлагаемая технология по сравнению с ти-

повой струйно-капельной пропиткой позволила снизить общий брак в 1,7 раза, в том числе из-за витковых замыканий – в 1,9 раза.

Статистическая проверка брака на одном из заводов за три года показала, что новая технология пропитки позволяет снизить брак в изготовлении электродвигателей 4АМ80 и 4АМАТ80, вызванный витковыми замыканиями с 2–2,2 до 0,5–0,7 %, что подтверждено заводскими испытаниями. Вероятность безотказной работы увеличилась с 0,91 до 0,95.

Существенным преимуществом предлагаемой технологии является то, что электростатически заряженная струя может изгибаться и вращаться и вибрировать под действием соответствующего вращающегося магнитного поля. Это позволяет исключить из технологии многочисленные энергоёмкие и шумящие электромеханические устройства, используемые в типовой струйно-капельной технологии пропитки, и, кроме того, существенно упростить автоматизацию пропитки. Существенно повысить эффективность предлагаемой технологии можно, если при её реализации использовать для управления нейронные сети [30]. Построенная математическая модель пропитки

электростатически заряженной струей пропиточного состава может служить основой для создания систем оптимального управления процессом пропитки аналогично тому, как это сделано в работах [30, 31].

#### Заключение

Обоснована новая технология пропитки обмоток электротехнических изделий электростатически заряженной струей пропиточного состава. Показано, что при использовании резко неоднородного поля можно снизить индукционное напряжение на сопле дозирующего устройства пропиточной установки. Обоснован коэффициент усиления поля в области вершины сопла, выполненного в виде эллипсоида вращения. Показано, что предлагаемая технология позволяет снизить производственный брак обмоток и повысить надежность их работы.

Предложенную технологию можно рекомендовать к использованию для всех типов электродвигателей, подвергающихся пропитке струйно-капельным методом, в частности для электродвигателей, работающих в наиболее ответственных отраслях, таких как нефтедобывающая и горнодобывающая промышленность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bolgova V.A., Supueva A.S., Leonov A.P. Influence of defects in windings insulation on its operation reliability // *Environment and Electrical Engineering (EEEIC-2016): Proc. 16th International Conference.* – Florence, Italy, June 7–10, 2016. – New York: IEEE, 2016. – P. 1–4.
2. Смирнов Г.В. Пооперационный контроль процесса изготовления обмоток электрических машин – М.: Научно-техническое изд-во «Горячая линия – Телеком», 2018. – 156 с.
3. Андрианов А.В., Андрианов В.К., Быков Е.В. Пробивное напряжение как критерий годности обмоточных проводов // *Кабели и провода.* – 2011. – № 6. – С. 17–20.
4. Андрианов В.К., Васильев Е.Б. Состояние производства и научно-технические аспекты развития обмоточных проводов в России // *Кабели и провода.* – 2014. – № 5 (348). – С. 3–6.
5. Gupta V. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines // *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference.* – Chicago, June, 2003. – P. 459–462.
6. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 68 с.
7. Воробьев В.Е., Кучер В.Я. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2004. – 56 с.
8. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study // *Physica.* – 2007. – V. 396. – № 11. – P. 132–137.
9. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* – 1999. – V. 6. – № 2. – P. 20–26.
10. Bohm F.R., Nagel K., Schindler H. A new generation of wire enamel for the production of magnet wires with outstanding corona resistance // *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference.* – Palermo, Italy, 2003. – P. 109–113.
11. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // *IEEE Transactions on Industry Applications.* – 1992. – V. 28. – № 4. – P. 921–937.
12. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines // *IEEE International Symposium on Electrical Insulation.* – Vancouver, British Columbia, Canada, 2008. – P. 257–260.
13. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications // D. Hwang, K. Lee, Y. Kim, I. Lee, T. Lim, D. Kim // *IEEE Industry Application Conference.* – Vancouver, British Columbia, Canada, 2003. – V. 1. – P. 432–438.
14. Fabiani D., Montanari G.C., Contin A. Aging acceleration of insulating materials for electrical machine windings supplied by PWM in the presence and in the absence of partial discharges // *IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics.* – Palermo, 2001. – P. 283–286.
15. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives // *IEEE Industry Applications Magazine.* – 2003. – V. 9. – № 4. – P. 22–31.
16. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs // *IEEE Insulation.* – 2008. – V. 6. – № 5. – P. 571–574.
17. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems // S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4134.
18. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel // *IEEE Transactions on Electrical Insulation.* – 1967. – V. 2. – № 3. – P. 141–145.
19. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors // M. Kaufhold, H. Auinger, M. Berth, J. Speck, M. Eberhardt // *IEEE Transactions on industrial electronics.* – 2000. – V. 47. – № 2. – P. 396–402.
20. Kaufhold M. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse controlled inverters // *IEEE Electrical Insulation Magazine.* – 1996. – V. 12. – № 5. – P. 9–16.
21. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments // N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, P. Maussion // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* – 2013. – V. 60. – № 7. – P. 19–26.
22. A method for endurance testing of enameled round and rectangular wires for motors controlled by SiC-based inverters // V. Gavrilenko, A. Leonov, A. Bukharkin, S. Hlioui, S. Lefebvre // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* – December 2021. – V. 28. – № 6. – P. 2091–2098.
23. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low voltage machines fed by PWM converters // M. Melfi, A.M.J. Sung, S. Bell, G.L. Skibinski // *IEEE Transactions on Industry Applications.* – 1997. – V. 1. – P. 239–246.

24. Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2009. – V. 25. – № 4. – P. 6–13.
25. Stone G.C., Culbert I.M., Lloyd B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conference Record. – 2007. – V. 6. – № 7 – P. 187–192.
26. Способ контроля дефектности изоляции обмоточных проводов: пат. Рос. Федерации № 2762300; заявл. 09.03.2021; опубл. 17.12.2021. Бюл. № 35. – 21 с.
27. Способ контроля дефектности изоляции обмоточных проводов: пат. Рос. Федерации № 2737511; заявл. 07.04. 2020; опубл. 01.12.2020. Бюл. № 34. – 19 с.
28. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т. 3, кн. 2. Использование электрической энергии / под ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудницкого, Л.А. Жукова и др. 6 изд. – М.: Энергоиздат, 1982. – 560 с.
29. Способ контроля и ремонта изоляции провода: пат. Рос. Федерации № 2745446; заявл. от 07.07.2020; опубл. 25.03.2021. Бюл. № 9. – 14 с.
30. Замятин Н.В., Смирнов Г.В. Нейросетевые компьютерные системы и их применение. – Томск: Изд-во Том. Гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2021. – 278 с.
31. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Изд-во «Наука», 1984. – 831 с.

Поступила: 02.02.2022 г.

#### Информация об авторах

**Смирнов Г.В.**, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.



UDC 621.315.62

## MODELING THE IMPREGNATION OF ELECTRIC MOTOR WINDINGS OF GENERAL INDUSTRIAL APPLICATIONS USED IN THE OIL AND MINING INDUSTRIES

Gennadiy V. Smirnov,  
smirnov@main.tusur.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin avenue, Tomsk, 634045, Russia.

**Relevance** of the work is related to the fact that currently the technological processes of exploration, extraction, transportation of geo-resources in the oil, mining, coal, chemical and other industries are subject to a high level of mechanization and automation involving electric machines. The reliability and trouble-free operation of these machines depend on the state of the winding insulation, the role of which is played by the insulation of the windings of electric motors. Reliability indicators of this element of the windings are laid in the process of their production. At the same time, a significant contribution to the mentioned indicators is made by the technological operation of impregnation. The probability of hiding defects in the insulation of the windings, thermal properties of electric motors, moisture resistance and solidity of the windings depend on how well this operation is carried out. Therefore, the improvement of impregnation and increase of its efficiency are very topical.

**The purpose** of the work is to create a mathematical model of the technological operation of impregnation with the use of electrostatic charging of the impregnating composition jet; to show that it is possible to reduce the level of induced voltage used for electrostatic charging of the impregnating composition jet by strengthening the electric field in the nozzle area, from which the frontal parts of the winding are watered with impregnating composition, by giving the nozzle a certain shape.

**Methods.** When creating a mathematical model, classical methods of solving differential equations describing electromagnetic fields were used, and experimental studies made it possible to establish the adequacy of the created model.

**Results.** The results of modeling and research of a new technology of impregnation of windings of electric machines with an electrostatically charged jet of impregnating composition are presented. A mathematical model was developed linking the field gain at the top of an ellipsoid nozzle with its geometric parameters. The experimental verification of the obtained model was carried out and the adequacy of the model to the experimental results was shown. The data of practical application of the obtained model on real factory installations are presented, showing the real possibility of reducing the voltage level at the nozzle and the effectiveness of the proposed impregnation of the windings. The advantages of the proposed technology are shown in comparison with typical impregnation technologies based on the data obtained in real production. The proposed technology will significantly reduce the likelihood of factory defects due to winding circuits in the windings, will increase the reliability of manufactured electric motors in the process.

### Key words:

Winding, control system, automation, impregnation, composition, jet impregnation method, electric field strength, electrostatic charging of the impregnation composition, induction method of charging particles, impregnation quality, ellipsoid, voltage, insulation.

### REFERENCES

1. Bolgova V.A., Supueva A.S., Leonov A.P. Influence of defects in windings insulation on its operation reliability. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC-2016): Proc. 16<sup>th</sup> International Conference*. Florence, Italy, June 7–10, 2016. New York, IEEE, 2016. pp. 1–4.
2. Smirnov G.V. *Pooperatsionny kontrol protsessa izgovleniya obmotok elektricheskikh mashin* [Operational control of manufacturing windings of electric machines]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2018. 156 p.
3. Andrianov A.V., Andrianov V.K., Bykov E.V. Probnovoe napryazhenie kak kriteriy godnosti obmototchnykh provodov [Breakdown voltage as a criterion for the validity of winding wires]. *Cables and wires*, 2011, no. 6, pp. 17–20.
4. Andrianov V.K., Vasiliev E.B. Sostoyanie proizvodstva i nauchno-tekhnicheskie aspekty razvitiya obmototchnykh provodov v Rossii [The state of production and scientific and technical aspects of the development of winding wires in Russia]. *Cables and wires*, 2014, no. 5 (348), pp. 3–6.
5. Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jabłoński M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
6. Bogdanova Yu.G. *Adgesia i ee rol v obespetchenii protochnosti polimernykh kompozitov* [Adhesion and its role in ensuring the strength of polymer composites]. Moscow, Moscow State University Publ. House, 2010. 68 p.
7. Vorobyev V.E., Kucher V.Ya. *Prognozirovaniye sroka sluzhby elektricheskikh mashin: pismennyye lektsii* [Forecasting the service life of electric machines: written lectures]. St. Petersburg, NWTU Publ. house, 2004. 56 p.
8. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study. *Physica*, 2007, vol. 396, no. 11, pp. 132–137.
9. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 20–26.
10. Bohm F.R., Nagel K., Schindle H. A new generation of wire enamel for the production of magnet wires with outstanding corona resistance. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Palermo, Italy, 2003. pp. 109–113.
11. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, vol. 28, no. 4, pp. 921–937.
12. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Vancouver, British Columbia, Canada, 2008. pp. 257–260.
13. Hwang D., Lee K., Kim Y., Lee I., Lim T., Kim D. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications. *IEEE Industry Application Conference*. Vancouver, British Columbia, Canada, 2003. Vol. 1, pp. 432–438.
14. Fabiani D., Montanari G.C., Contin A. Aging acceleration of insulating materials for electrical machine windings supplied by PWM in the presence and in the absence of partial discharges. *IEEE 7<sup>th</sup> International Conference on Solid Dielectrics*. Palermo, 2001. pp. 283–286.

15. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 22–31.
16. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs. *IEEE Insulation*, 2008, vol. 6, no. 5, pp. 571–574.
17. Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4134.
18. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1967, vol. 2, no. 3, pp. 141–145.
19. Kaufhold M., Auinger H., Berth M., Speck J., Eberhardt M. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2000, vol. 47, no. 2, pp. 396–402.
20. Kaufhold M. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse controlled inverters. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1996, vol. 12, no. 5, pp. 9–16.
21. Lahoud N., Faucher J., Malec D., Maussion P. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 7, pp. 19–26.
22. Gavrilenko V., Leonov A., Bukharkin A., Hlioui S., Lefebvre S. A method for endurance testing of enameled round and rectangular wires for motors controlled by SiC-based inverters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, December 2021, vol. 28, no. 6, pp. 2091–2098.
23. Melfi M., Sung A.M.J., Bell S., Skibinski G.L. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low voltage machines fed by PWM converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, vol. 1, pp. 239–246.
24. Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 6–13.
25. Stone G.C., Culbert I.M., Lloyd B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives. *IEEE Cement Industry Technical Conference Record*, 2007, vol. 6, no. 5, pp. 187–192.
26. Smirnov G. V. *Sposob kontrolya defektnosti izolyatsii obmotchnykh provodov* [Method of control of defective insulation of winding wires]. Patent RF no. 2762300, 2021.
27. Smirnov G.V. *Sposob kontrolya defektnosti izolyatsii obmotchnykh provodov* [Method of control of defective insulation of winding wires]. Patent RF no. 2737511, 2020.
28. *Elektrotekhicheskiy spravotchnik. Ispolzovanie elektricheskoy energii* [Electrical reference book. The use of electrical energy]. Eds. V.G. Gerasimov, P.G. Grudnitsky, L.A. Zhukov. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. Vol. 3, B. 2, 60 p.
29. Smirnov G.V. *Sposob kontrolya i remonta izolyatsii provoda* [Method of control and repair of wire insulation]. Patent RF no. 2745446, 2021.
30. Zamyatin N.V., Smirnov G.V. *Nayrosetevye kompyuternye sistemy i ikh primeneniye* [Neural network computer systems and their application]. Tomsk, State University of Control and Radioelectronics Publ. House, 2021. 278 p.
31. Korn G., Korn T. *Spravotchnik po matematike* [Handbook of mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 831 p.

*Received: 2 February 2022.*

#### Information about the authors

**Gennadiy V. Smirnov**, Dr. Sc., professor, director of the Research Institute of Electronic Equipment and Communication Facilities, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.