

УДК 620.9

Анализ деполимеризации изоляционных составов обмоток электродвигателей на основе ультразвукового излучения

А. И. Кашин*, А. Е. Немировский

*Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: kashin-tema@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9303-3973>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
02.12.2021

Ключевые слова:

электродвигатель,
ремонт
электродвигателей,
демонтаж обмоток,
ультразвук,
деполимеризация,
математическая модель,
оптимальные параметры

Данная статья является продолжением фундаментального изучения инновационного метода ремонта электродвигателей с помощью воздействия ультразвука. Проведено исследование метода демонтажа обмоток на основе ультразвука в целях энергоэффективности, экологичности и меньших временных затрат на цикл ремонта электродвигателей в части выемки обмотки статора. Исследуемый способ демонтажа оптимален по ряду технических вопросов в сравнении с существующими методами демонтажа обмоток электродвигателей. В работе основной упор сосредоточен на материале изоляции обмоток. Анализируются лаковая и компаундная виды изоляции промышленных электродвигателей, которые повсеместно являются основными. Произведен анализ пропиточных электроизоляционных составов обмоток статора электродвигателей и влияние ультразвука на них при демонтаже обмоток электродвигателей при разных уровнях влияния воздействующих факторов: продолжительности и мощности ультразвукового воздействия, концентрации и температуры рабочего раствора. Применяемые математические программные комплексы по вычислению и моделированию гарантируют достоверность и рациональность полученных в ходе работы результатов проведенных экспериментов. Смоделирована система уравнений и построены модели воздействия полезных факторов относительно друг друга, произведена оптимизация полученных результатов и выявлены оптимальные параметры как лаковой, так и компаундной систем изоляции. Оптимальные параметры исследуемых типов изоляции показали обнадеживающие результаты по многим важным пунктам: продолжительности, энергозатрат, экологичности.

Для цитирования

Кашин А. И. и др. Анализ деполимеризации изоляционных составов обмоток электродвигателей на основе ультразвукового излучения. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 4. С. 361–371. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-361-371>.

Analysis of depolymerization of insulating compositions of electric motor windings based on ultrasonic radiation

Artem I. Kashin*, Alexander E. Nemirovsky

*Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia;
e-mail: kashin-tema@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9303-3973>

Article info

Received
02.12.2021

Key words:

electric motor,
repair of electric motors,
dismantling of windings,
ultrasound,
depolymerization,
mathematical model,
optimal parameters

Abstract

This work is a continuation of the fundamental study on implementing an innovative method of repairing electric motors using ultrasound. A study of the method of dismantling windings based on ultrasound has been carried out for the purpose of energy efficiency, environmental friendliness and less time spent on the repair cycle of electric motors in terms of removing the stator winding. The investigated dismantling method is optimal for a number of technical issues in comparison with the existing methods for dismantling electric motor windings. In the work, the main focus is on the material of the winding insulation. Lacquer and compound types of insulation of industrial electric motors, which are the main ones everywhere, have been analyzed. The analysis of the impregnating electrical insulating compositions of the stator windings of electric motors and the influence of ultrasound on them during dismantling of the windings of electric motors at different levels of influence of forcing factors: duration and power of ultrasonic action, concentration and temperature of the working solution. The applied mathematical software systems for calculation and modeling guarantee the reliability and rationality of the results of the experiments obtained during the work. A system of equations has been modeled and models of the effect of useful factors relative to each other have been constructed, the results obtained have been optimized and the optimal parameters of both varnish and compound insulation systems have been identified. The optimal parameters of the investigated types of insulation show encouraging results on many important points: duration, energy consumption, environmental friendliness.

For citation

Kashin, A. I. et al. 2021. Analysis of depolymerization of insulating compositions of electric motor windings based on ultrasonic radiation. *Vestnik of MSTU*, 24(4), pp. 361–371. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-361-371>.

Введение

Электрические машины, в частности электродвигатели (ЭД), относятся к крупным потребителям электроэнергии. Расширение промышленного производства ведет за собой увеличение нагрузки на электрическую сеть. В России ЭД потребляют большую часть (порядка 77–82 %) вырабатываемой электроэнергии. В промышленности и сельскохозяйственном производстве ЭД эксплуатируются в весьма жестких условиях. Повышенная влажность, запыленность, агрессивная среда, низкое качество питающего напряжения ежегодно приводят к выходу из строя до 18–20 % ЭД (Хомутов и др., 2009). Это влечет за собой крупный материальный и производственный ущерб предприятиям агропромышленного комплекса, металлургической сферы и машиностроительного сектора промышленности. Большинство отказов ЭД провоцирует нарушение технологической составляющей производства и появление брака выходной продукции. Выход из строя электродвигателей на предприятиях АПК приводит к низкой производительности. Также возникает проблема пожаробезопасности для большинства предприятий из-за коротких замыканий в толщах обмоток статора или ротора, это несет дополнительный ущерб. Замена неисправных электродвигателей на новые приводит к еще более весомым затратам. Большая часть "сгоревших" ЭД подлежит ремонту и перемотке обмоток. Своими характеристиками отремонтированный ЭД должен соответствовать всем необходимым требованиям и показателям надежности и эффективности в работе. Качество ремонта и применяемые при этом материалы (обмотка, пропитка, методы удаления) значительно влияют на характер и срок дальнейшей эксплуатации отремонтированного электродвигателя (Гашимов и др., 2004). Способ демонтажа "сгоревшей" обмотки при ремонтных работах оказывает весомое влияние на качество предстоящей работы и срок службы ЭД.

Материалы и методы

В данное время повсеместно используются следующие способы демонтажа обмоток ЭД (Соколов, 1988; Павлович и др., 2009) (аналогов предлагаемого нами метода на основе ультразвука не существует).

1. Механический метод ремонта (токарные или специальные станки). Недостатком данного метода являются задиры, заусеницы, царапины. Данные механические повреждения негативно влияют на изоляцию всыпной обмотки. В итоге страдает качество ремонтного цикла и дальнейший ресурс электродвигателя.

2. Высокочастотный метод ремонта (высокочастотные термические комплексы). При нагревании сердечника выемка обмоток будет происходить совместно с пазовыми коробочками. Работа по очистке паза не потребует. Данный метод эффективен по времени цикла, но неэффективен по энергопотреблению и возможному перегреву сердечника.

3. Термический обжиг на костре (Защита..., 1997): ЭД (статор и корпус) обжигается открытым неравномерным огнем. Возможна физическая деформация статоры и корпуса неисправного электродвигателя. Происходит ухудшение магнитных свойств стали.

4. Тепловой метод ремонта (термические печи). Неисправные обмотки статора ЭД помещают в термическую печь на 8 часов при температуре более 300 °С. Отсутствие равномерного теплового поля говорит о возможном возгорании изоляции обмоток, которые увеличивают температуру нагрева в локальных зонах термической печи. Возможен перегрев листов стали статора, увеличение удельных потерь в стали, уменьшение КПД. После нескольких обжигов возможно нарушение тугой посадки между пакетом и корпусом, что приводит в дальнейшем к увеличению тока холостого хода ЭД.

5. Химический метод ремонта. Использование химических агрессивных веществ делает данный метод неэкологичным и отрицательно влияет на эксплуатационный персонал с риском получения химических ожогов.

6. Метод выщелачивания. Негативно влияет на рабочий персонал из-за применения щелочи.

Кроме упомянутых недостатков вышеперечисленные методы извлечения обмоток статора электродвигателей приводят ко многим отрицательным последствиям: уменьшается коэффициент полезного действия ЭД и послеремонтный срок службы электродвигателей, увеличиваются ток холостого хода и энергопотребление. Именно поэтому разработка инновационной технологии извлечения неисправной обмотки статора электродвигателя является чрезвычайно актуальной (Худоногов и др., 2009; Finley et al., 2000; Осадченко и др., 2006).

Наряду с этим появление внутреннего напряжения в изоляции порождает усталостный эффект, что вызывает повреждения изоляции.

Данная статья продолжает цикл исследований по инновационному методу ремонта электродвигателей с помощью ультразвукового излучения; основное внимание уделено анализу деполимеризации изоляционных составов обмоток электродвигателей на основе ультразвукового излучения.

На кафедре электрооборудования Вологодского государственного университета для извлечения обмоток неисправного ЭД разработаны метод и аппаратный комплекс на основе ультразвуковых явлений,

в которых известные недостатки применяемых на сегодня методов демонтажа устранены. Извлечение неисправных обмоток статора ЭД осуществляется при совместном использовании ультразвуковых колебаний и едкого натра с 2%-й концентрацией в виде рабочей жидкости. Концентрация рабочей жидкости занижена в 5 раз по сравнению с методом выщелачивания.

Изоляционные качества обмоток зависят от материалов изготовления. Пропитка помогает избежать быстрого увлажнения и старения изоляционной составляющей обмотки. Также пропитка заполняет все пустоты и дефектные места проводов, цементируя обмотку электродвигателя, увеличивая тем самым срок службы изоляции (*Барэмбо и др., 1961*).

В Российской Федерации обычно в качестве пропитывающего состава обмоток применяют лаки и компаунды (МЛ-92, БТ-987, ГФ-95, КП-303, Элпласт-180, Элком КП-11 и др.). "Сгоревшие" ЭД подлежат ремонту и демонтажу неисправной обмотки.

В процессе изучения инновационного метода была проведена реализация статистически спланированного эксперимента. Данный эксперимент позволил определить оптимальные параметры процесса демонтажа неисправных обмоток статора ЭД. Обмотки были пропитаны лаком МЛ-92 и компаундом КП-303. Технология данного метода защищена патентом на изобретение и формулируется следующим образом: "Способ деполимеризации системы изоляции электродвигателей ультразвуковым излучением". При опускании статора электродвигателя в ультразвуковую ванну с рабочим раствором едкого натра происходит кавитационный эффект, в результате которого от поверхности обмотки под действием энергии микровзрывов происходит отделение частичек изоляционной пропитки (*Авилов и др., 2006; Mukerji et al., 2015*). При кавитации едкий натр позволяет возникнуть капиллярному эффекту, благодаря которому водный раствор быстрее проникает в толщу изоляции пазов статора и пазовой коробочки. Данный фактор значительно уменьшает время ремонта и очистки.

Сравнение электротехнических параметров лака марки МЛ-92 и компаунда марки КП-303 производилось при проведении достаточно большого количества экспериментов по изучению инновационного метода демонтажа на основе ультразвука и заключалось в выявлении и сравнении оптимальных параметров процесса извлечения неисправных обмоток ЭД.

Таблица 1. Сравнение электрофизических характеристик пропиточных составов
Table 1. Comparison of electrophysical characteristics of impregnating compounds

Показатель Марка	Единица измерения	МЛ-92	КП-303
Документ	–	ГОСТ 15865-70 ¹	ТУ2257-019-31995305-2003 ²
Кислотное число	мг КОН	10	–
Класс нагревостойкости		В (130 °С)	Н (180 °С)
Твердость покрытия по маятниковому прибору типа М-3, не менее (при 20 ± 1 °С)	Усл. ед.	0,40	0,71
Маслостойкость пленки, не менее	Ч.	78	–
Электрическая прочность пленки, не менее (при 20 ± 2 °С)	МВ/м	45	25

По данным табл. 1 можно сделать вывод, что физические показатели применяемых составов различаются. Соответственно это будет вносить коррективы в получаемые оптимальные параметры, так как основные характеристики ведут себя по-разному при кавитации. Наблюдается значимое отличие в классе нагревостойкости, при этом в эксперименте один из воздействующих факторов – температура. Таким образом, оптимальные параметры в плане температуры будут различаться. То же самое можно сказать про показатель твердости покрытия.

Главная цель исследований – определить основные различия применяемых пропиточных составов обмоток электродвигателей при инновационном методе демонтажа.

Построение математической модели входит в исследование анализа деполимеризации изоляционных составов обмоток электродвигателей на основе ультразвукового излучения. Методы статического и математического планирования основываются на аналитической связи факторов и откликов проводимого эксперимента, в ходе которого определяют область оптимальных значений параметров по виду и анализу геометрической формы поверхности отклика. Данные методы позволяют быстро и верно решать сложные

¹ ГОСТ 15865-70. Лак электроизоляционный МЛ-92. Технические условия. М., 2003.

² ТУ 2257-019-31885305-2003 "Компаунд электроизоляционный марки КП-303". Документ № 77.01.12.225.Т.028611.12.03 от 16 декабря 2003. Разработчик ЗАО "Диэлектрик".

циклические задачи, сокращая временные ресурсы. Для решения прямых и косвенных задач деполимеризации в исследованиях используется активный статистически спланированный эксперимент, проанализированный и обработанный в программном обеспечении РТС Mathcad, теоретические основы физики ультразвука, применена теория оптимизации функции нескольких переменных и математическая статистика.

В ходе проведения исследований и реализации матрицы эксперимента изменялась концентрация раствора NaOH, его температура, длительность воздействия УЗИ на статор. Реализована матрица со звездными точками с тремя уровнями варьирования четырех воздействующих факторов (Хикс, 1967; Шенк, 1972). За минимальную температуру выбрана температура окружающей среды 20 °С, за максимальную – 70 °С, так как при большем нагреве идет процесс естественной кавитации – кипения. Уровни варьирования представлены в табл. 2.

Минимальное и максимальное значения продолжительности воздействия факторов X_1, X_2, X_3, X_4 определены в ходе поисковых исследований.

Таблица 2. Уровни варьирования факторов
Table 2. Levels of variation of factors

Независимый фактор	Условное обозначение	Уровень варьирования			Интервал варьирования
		-1 min	0	+1 max	
Продолжительность воздействия, мин	X_1	30	100	170	70
Температура, °С	X_2	20	35	50	15
Мощность ультразвукового излучения, Вт	X_3	40	90	140	50
Концентрация раствора, %	X_4	2	4,5	7	2,5

Результаты и обсуждение

Для проведения многофакторного эксперимента, который является частью углубленного исследования, потребовалось разработать и сконструировать аппаратный комплекс.

На рис. 1 изображена структурная схема аппаратного комплекса.

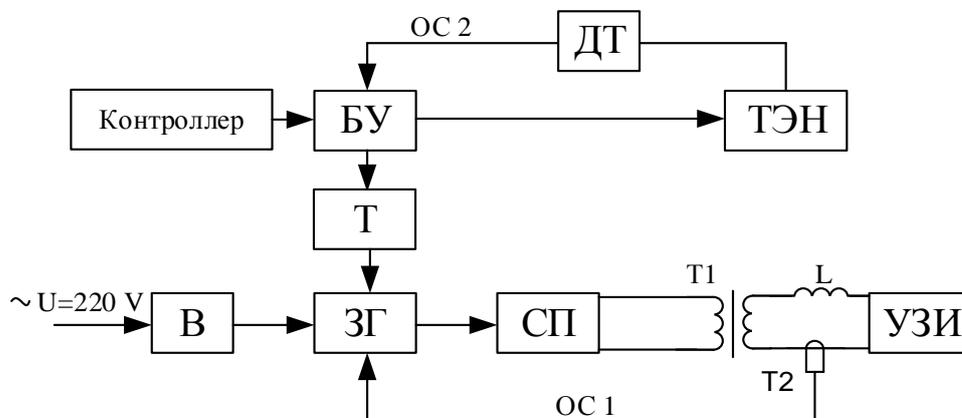


Рис. 1. Структурная схема аппаратного комплекса
Fig. 1. Block diagram of the hardware complex

На рис. 2 изображена принципиальная схема аппаратного комплекса.

Исследования с использованием аппаратного комплекса и ультразвуковой ванны провели на специально изготовленных макетах обмотки ЭД – статоретах (рис. 3). Статореты были изготовлены согласно ГОСТ-ИЕК 60851-3-2011³ и представляют собой макеты пазовой и междуфазной изоляции ЭД. При создании статоретов максимально сохранялись физико-механические свойства статора ЭД. Статореты выполнены из профильной трубы с медной обмоткой из провода ПЭТВ-2 (120 витков, 1 мм диаметр). В качестве материала для пазовой изоляции применили синтокартон. Лобовая часть статоретов обмотана хлопчатобумажным биндом для прочности. Весь макет статорной обмотки пропитан либо лаком МЛ-92, либо компаундом КП-303.

³ ГОСТ ИЕК 60851-3-2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 3. Механические свойства. М., 2013. 28 с.

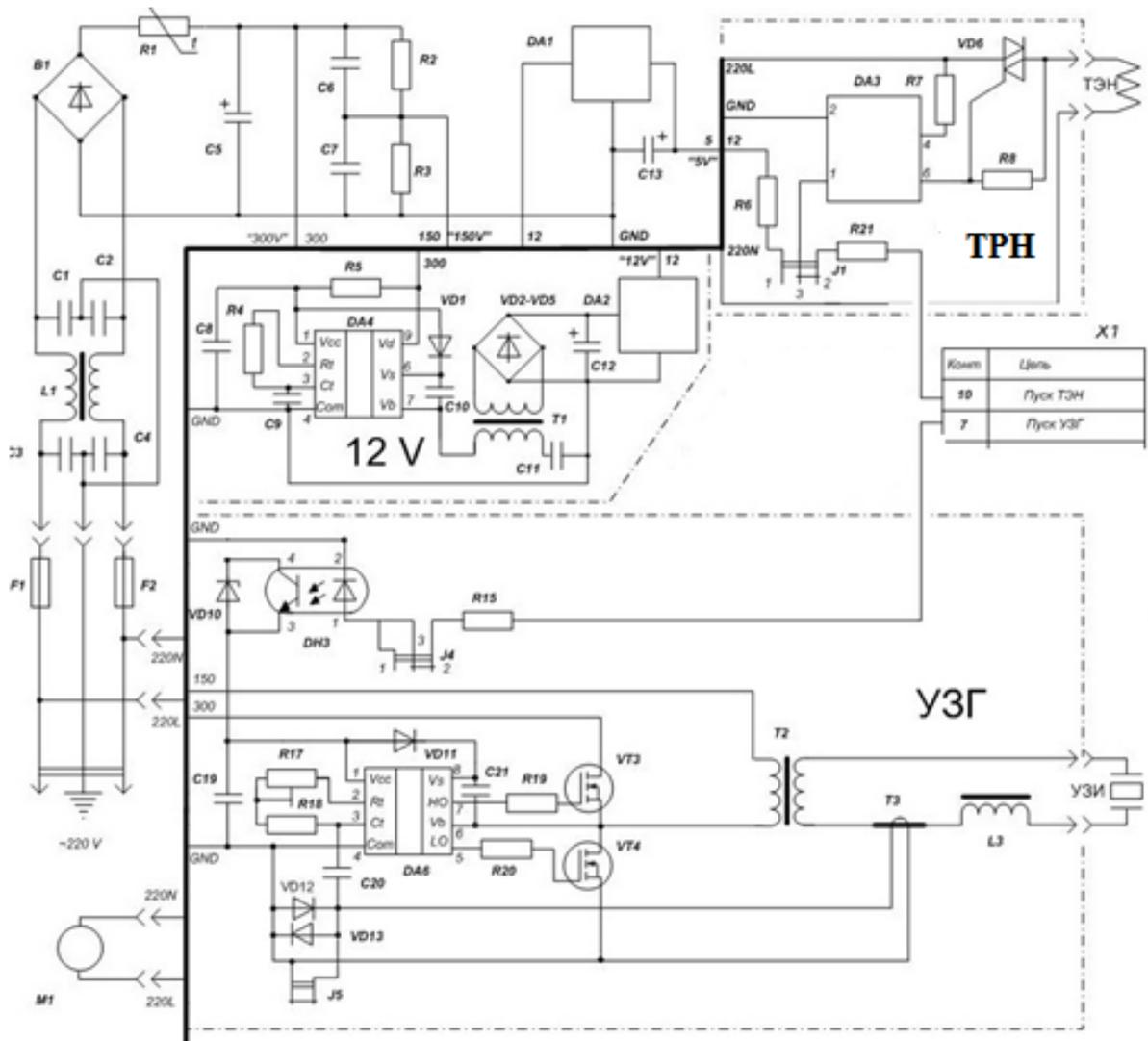


Рис. 2. Электрическая схема аппаратного комплекса
 Fig. 2. Electrical diagram of the hardware complex



Рис. 3. Опытный образец (статор)
 Fig. 3. Prototype (stator)

В качестве выходных функций отклика выбраны механические характеристики обмоток. К ним относятся склеиваемость витков обмотки между собой и остаточная прочность обмотки⁴. Для снятия данных прочностных характеристик был спроектирован и реализован стенд (рис. 4), который позволяет исследовать влияние разрушающих факторов на пропиточный состав обмотки ЭД с различными уровнями воздействия.

⁴ ГОСТ ИЕК 60851-3-2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 3. Механические свойства. М., 2013. 28 с.

Уровни воздействия факторов варьируются в каждом опыте согласно матрице эксперимента и по-разному влияют на разрушение монолитности пропиточного состава обмотки ЭД.

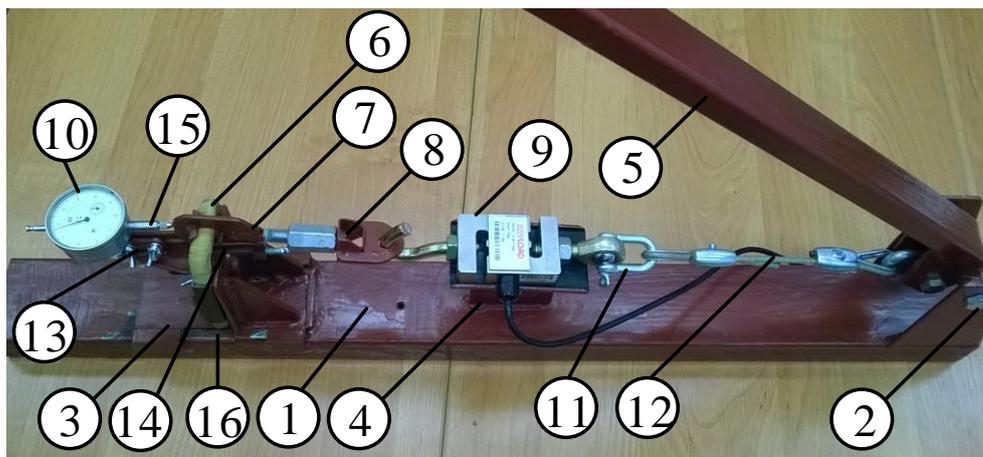


Рис. 4. Конструкция стенда: 1 – станина; 2 – вилка; 3 – сменная насадка; 4 – столик тензодатчика; 5 – рычаг; 6 – макет статора; 7 – индентор; 8 – натяжной механизм; 9 – тензодатчик; 10 – индикатор часового типа; 11 – такелажная петля; 12 – трос; 13 – кронштейн; 14 – фиксирующая струбцина; 15 – шток индикатора ИЧ; 16 – площадка для сменных насадок
 Fig. 4. Stand design: 1 – bed; 2 – fork; 3 – replaceable nozzle; 4 – load cell table; 5 – lever; 6 – stator layout; 7 – indenter; 8 – tension mechanism; 9 – load cell; 10 – hour type indicator; 11 – rigging loop; 12 – cable; 13 – bracket; 14 – fixing clamp; 15 – stock of the ICH indicator; 16 – platform for replaceable nozzles

Данный стенд позволяет снять три типа зависимостей (функций отклика)⁵:

- 1) зависимость значения прогиба, мм, основания лобовой части обмотки статора от усилия, кН, воздействия (остаточная прочность);
- 2) зависимость значения прогиба, мм, толщи обмотки лобовой части статора от усилия, кН, воздействия на нее (остаточная склеиваемость);
- 3) усилие выдергивания обмотки из пазов, кН.

Также в установку входят измерительные приборы: электронный динамометр марки ДЭПЗ-1Д-1У-1 и ИЧ-индикатор часового типа марки ИЧ-10.

Статореты фиксируются на сменных насадочных модулях (рис. 5) с помощью металлических пластин, затягиваемых гайкой барашкового типа.

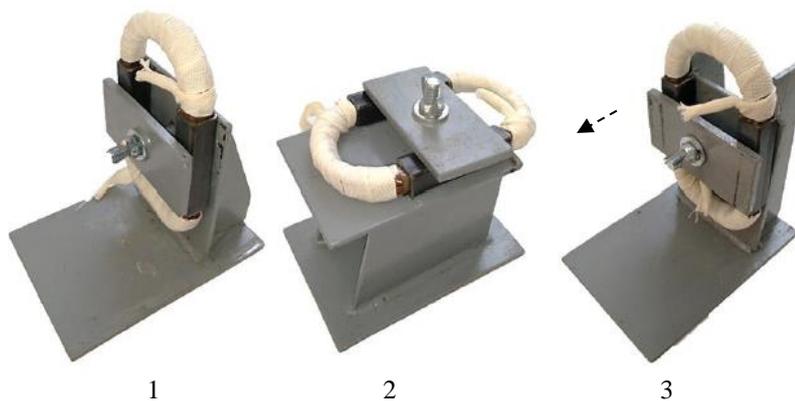


Рис. 5. Сменные насадочные модули стенда: 1 – для снятия изменений остаточной прочности; 2 – для снятия показаний характеристики усилия выдергивания статорной обмотки из паза; 3 – для снятия измерений остаточной склеиваемости витков обмотки между собой
 Fig. 5. Replaceable attachment modules of the stand: 1 – to remove changes in residual strength; 2 – to take readings of the characteristics of the force of pulling the stator winding out of the groove; 3 – to take measurements of the residual adhesive strength of the winding turns

⁵ ГОСТ ИЕК 60851-3-2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 3. Механические свойства. М., 2013. 28 с.

Для каждого насадочного модуля предусмотрен свой определенный инденторный модуль, без которого невозможно снять определенные механические характеристики обмотки ЭД (рис. 6).

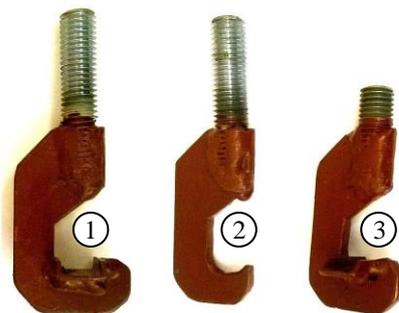


Рис. 6. Инденторные модули: 1 – для определения остаточной прочности; 2 – для определения остаточной склеиваемости; 3 – для определения усилия выдергивания обмотки
Fig. 6. Indicator modules: 1 – to determine the residual strength; 2 – to determine the residual adhesive strength; 3 – to determine the pulling force of the winding

В ходе статистически спланированного эксперимента получены математические функции (модели) деполимеризации неисправной обмотки статора для дальнейшего беспрепятственного ее извлечения (1, 2). Оценка значимости функций регрессии (1, 2) произведена на основе F -критерия Фишера. Существенность коэффициентов регрессии проверена по критерию распределения Стьюдента. Воспроизводимость опытов проверена по критерию Кохрена (Хикс, 1967; Шенк, 1972).

Уравнение регрессии для функции остаточной прочности:

$$Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = 0,381 - 0,097X_1 - 0,073X_2 - 0,051X_3 - 0,018X_4 - 0,013X_1X_2 + 0,037X_2X_3 - 0,046X_2X_4 - 0,03X_3X_4 - 0,049X_1X_2X_4 + 0,023X_1X_3X_4 - 0,116X_2X_3X_4 + 0,134X_1X_2X_3X_4 + 0,04X_1^2 - 0,023X_2^2 + 0,065X_4^2. \quad (1)$$

Уравнение регрессии для функции остаточной склеиваемости:

$$Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = 0,529 - 0,077X_1 - 0,057X_2 - 0,059X_3 - 0,03X_4 - 0,029X_1X_2 + 0,035X_2X_3 - 0,018X_1X_3 - 0,04X_2X_4 - 0,023X_3X_4 - 0,028X_1X_2X_4 - 0,097X_2X_3X_4 + 0,112X_1X_2X_3X_4 + 0,055X_1^2 - 0,015X_2^2 - 0,026X_3^2 + 0,083X_4^2. \quad (2)$$

При анализе функций (1, 2) становится очевидным, что наиболее значимый вклад в деполимеризацию монолитности изоляционной пропитки вносит продолжительность воздействия ультразвука. Значение фактора продолжительности времени можно уменьшить в разы по сравнению с существующими методами извлечения неисправных обмоток. Факторы воздействия температуры раствора и мощности ультразвука также имеют значимость в разрушении пропиточного состава, вместе с тем их влияние примерно одинаково на процессы разрушения монолитности и размягчение неисправной обмотки. Концентрация рабочего раствора меньше всего влияет на процесс демонтажа обмотки ЭД. Это дает возможность значительно уменьшить экологический ущерб и влияние на эксплуатационный персонал. Мы уменьшаем концентрацию почти в 2 раза.

Неоднородность, неравномерность анализируемых функций характеризуется положительным знаком коэффициентов регрессии взаимодействия двух, трех, четырех факторов.

При получении оптимальных параметров воздействующих факторов на процесс деполимеризации обмотки неисправного ЭД необходимо найти частные производные от каждого фактора и решить полученную систему уравнений для каждой функции отклика:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y(X_1, X_2, X_3, X_4)}{\partial X_1} &= 0; & \frac{\partial Y(X_1, X_2, X_3, X_4)}{\partial X_3} &= 0; \\ \frac{\partial Y(X_1, X_2, X_3, X_4)}{\partial X_2} &= 0; & \frac{\partial Y(X_1, X_2, X_3, X_4)}{\partial X_4} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Решив (3), получаем в относительных единицах:

– для остаточной прочности – следующие показатели воздействующих факторов: $X_1 = 1,024$; $X_2 = 1,03$; $X_3 = 0,525$; $X_4 = 0,738$;

– для склеиваемости витков обмотки – следующие показатели воздействующих факторов: $X_1 = 0,83$; $X_2 = 1$; $X_3 = 0,596$; $X_4 = 0,659$.

В именованных единицах это будет выглядеть следующим образом:

$$X_1 = \frac{X_1^n - X_1^0}{\Delta X_1}; \quad (4)$$

$$X_3 = \frac{X_3^n - X_3^0}{\Delta X_3}; \quad (5)$$

$$X_2 = \frac{X_2^n - X_2^0}{\Delta X_2}; \quad (6)$$

$$X_4 = \frac{X_4^n - X_4^0}{\Delta X_4}, \quad (7)$$

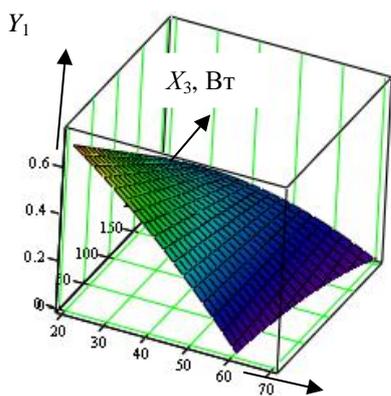
где $X_1^n, X_2^n, X_3^n, X_4^n$ – именованные значения факторов; $X_1^0, X_2^0, X_3^0, X_4^0$ – значения нулевого уровня варьирования факторов; $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \Delta X_4$ – интервалы варьирования факторов (Хукс, 1967; Шенк, 1972).

С учетом выражений (4–7) получены оптимальные значения параметров X_1, X_2, X_3, X_4 в именованных единицах для процесса наиболее эффективного и качественного демонтажа неисправных обмоток ЭД с лаковой пропиткой на основе ультразвуковых явлений. В табл. 3 представлены минимальные оптимальные значения факторов для определенных механических характеристик функций отклика. Показатель температуры дает обнадеживающие результаты по сравнению с недостатками существующих методов из-за высокой температуры процесса демонтажа.

Таблица 3. Оптимальные параметры (лаковая пропитка)
Table 3. Optimal parameters (varnish impregnation)

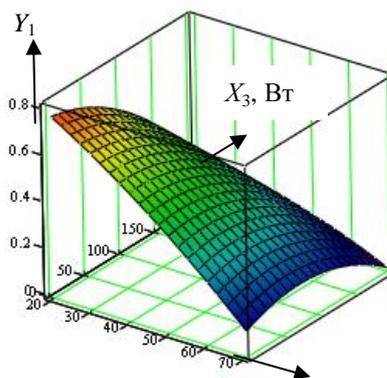
Фактор	Минимальные значения остаточной прочности	Минимальные значения остаточной склеиваемости
X_1^n , мин	171	159
X_2^n , °С	50,45	50
X_3^n , Вт	116,25	120
X_4^n , %	6,3	6,1

Из уравнений (1) и (2) получены частные уравнения регрессии, по которым на рис. 7 с использованием программного комплекса Mathcad смоделированы поверхностные модели функций отклика для рассматриваемых выходных механических характеристик.



a

$$y = 0,5535 - 7,7 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 - 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 + 6,3 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_3 - 8,3 \cdot 10^{-5} \cdot X_2^2$$



b

$$y = 0,935 - 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 + 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_3 - 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot X_2^2 - 10^{-5} \cdot X_3^2$$

Рис. 7. Поверхностные модели функций отклика:

a – остаточная прочность при $X_1 = 171$ мин; $X_4 = 6,3$ %;

b – остаточная склеиваемость при $X_1 = 159$ мин; $X_4 = 6,1$ %

Fig. 7. Surface models of response functions:

a – residual strength at $X_1 = 171$ min; $X_4 = 6.3$ %; b – residual bonding at $X_1 = 159$ min; $X_4 = 6.1$ %

Для сравнения оптимальных параметров различных систем изоляции проведен такой же эксперимент для компаундированной системы изоляции (рис. 8).

Модель регрессии для функции остаточной прочности:

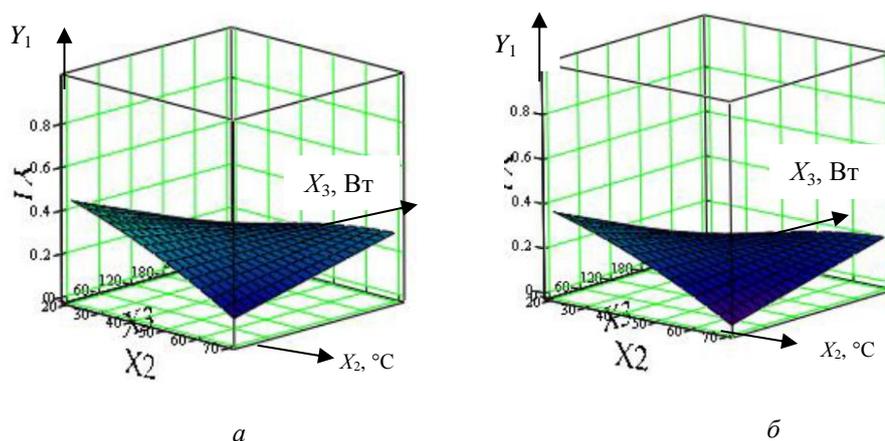
$$Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = 0,234 - 0,056X_1 - 0,043X_2 - 0,029X_3 + 0,013X_1X_2 + 0,026X_2X_3 - 0,026X_2X_4 - 0,016X_3X_4 - 0,029X_1X_2X_4 + 0,018X_1X_3X_4 - 0,076X_2X_3X_4 + 0,091X_1X_2X_3X_4 + 0,028X_1^2 - 0,011X_2^2 + 0,042X_4^2. \quad (8)$$

Модель регрессии для функции остаточной склеиваемости:

$$Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = 0,312 - 0,049X_1 - 0,072X_2 - 0,063X_3 - 0,029X_4 - 0,042X_1X_2 + 0,027X_2X_3 - 0,023X_1X_3 - 0,036X_2X_4 - 0,021X_3X_4 - 0,042X_1X_2X_4 - 0,088X_2X_3X_4 + 0,107X_1X_2X_3X_4 + 0,046X_1^2 - 0,013X_2^2 - 0,023X_3^2 + 0,074X_4^2. \quad (9)$$

Таблица 4. Оптимальные параметры (компаундированная пропитка)
 Table 4. Optimal parameters (compounded impregnation)

Фактор	Минимальные значения остаточной прочности	Минимальные значения остаточной склеиваемости
$X_1^н$, мин	177	154
$X_2^н$, °C	42,3	42,4
$X_3^н$, Вт	192	118
$X_4^н$, %	4,5	4,8



$$y = 0,423 - 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 - 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 + 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_3 - 7,9 \cdot 10^{-5} \cdot X_2^2$$

$$y = 0,395 - 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 - 1,35 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 + 2,95 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_3 - 5,61 \cdot 10^{-5} \cdot X_2^2 - 1,23 \cdot 10^{-5} \cdot X_3^2$$

Рис. 8. Поверхности функций отклика:

а – остаточная прочность при $X_1 = 30$ мин; $X_4 = 4,5$ %;

б – остаточная склеиваемость при $X_1 = 100$ мин; $X_4 = 4,5$ %

Fig. 8. Surfaces of response functions:

а – residual strength at $X_1 = 30$ min; $X_4 = 4.5$ %; б – residual bonding at $X_1 = 100$ min; $X_4 = 4.5$ %

С помощью математического пакета MathCad найдены и построены математические модели разрушения пропиточных составов для остаточной прочности обмоток электродвигателей с различными системами изоляции и проведен их сравнительный анализ.

Таблица 5. Оптимальные параметры, полученные в процессе эксперимента
 Table 5. Optimal parameters obtained during the experiment

Воздействующий фактор	Остаточная прочность	
	Компаунд КП-303	Лак МЛ-92
$X_1^н$, мин	177	171
$X_2^н$, °C	42,3	50,45
$X_3^н$, Вт	192	116,25
$X_4^н$, %	4,5	6,3

Заключение

При компаундированной изоляции обмоток наиболее значимое влияние на деполимеризацию пропиточного состава обмотки оказывают продолжительность воздействия и мощность ультразвуковых колебаний, температура рабочей жидкости едкого натра. Из полученных результатов видно, что для двух систем изоляции параметр продолжительности почти совпадает с погрешностью в несколько процентов, при этом остальные параметры воздействующих факторов различаются наиболее значимо.

Внешние условия и свойства жидкости имеют сильное влияние на развитие и интенсивность кавитационного эффекта (*Агранат и др., 1987*).

Анализируя полученные результаты можно сказать, что при увеличении температуры давление внутри пузырька уменьшается, энергия микровзрыва уменьшается и ослабевает. Увеличение температуры уменьшает мощность ультразвука в связи с естественной кавитацией жидкости (кипячение).

Плавное увеличение мощности ультразвукового излучателя способствует росту радиуса кавитационных пузырьков. В итоге возрастает ударная волна и эффект разрушения электроизоляционной конструкции "сгоревшего" ЭД. Вместе с тем нельзя превысить мощность УЗИ сверх допустимого значения. В противном случае может быть разрушена лаковая изоляция между пластинами шихтованного магнитопровода ЭД и даже начаться разрушение самого магнитопровода. Поэтому определенное повышение температуры раствора, в котором происходит разрушение старой изоляции ЭД, дает возможность снизить мощность УЗИ, не допустив проявления вышеупомянутых последствий.

Из проведенных исследований следует, что ЭД с компаундированной системой изоляции можно подвергать ремонту с применением ультразвукового излучения в наиболее благоприятных эксплуатационных условиях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Авилов В. Д., Абрамян А. А. Моделирование электромагнитных процессов в изоляции. Межвузовский тематический сборник научных трудов. Омск, Омский государственный университет путей сообщения, 2006. С. 18–27.
- Агранат Б. А., Дубровин М. Н., Хавский Н. Н. Основы физики и техники ультразвука. М. : Высш. шк., 1987. 381 с.
- Барэмбо, К. Н., Бернштейн Л. М. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин. М. : Государственное энергетическое издательство, 1961. 368 с.
- Гашимов М. А., Абдуладзе С. В. Исследование в целях диагностики физических процессов функционирования электрических машин при неисправностях в обмотке статора и ротора. *Электротехника*. 2004. № 2. С. 20–27.
- Осадченко А. А., Рапопорт О. Л., Цукублин А. Б., Щербатов В. В. Прогнозирование ресурса тяговых электродвигателей. *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2006. № 3. С. 14–16.
- Павлович С. Н., Фираго Б. И. Ремонт и обслуживание электрооборудования. Минск : Выш. шк., 2009. 245 с.
- Соколов В. В., Цурпал С. В., Конов Ю. С., Короленко В. В. Определение деформаций обмоток крупных силовых трансформаторов // *Электрические станции*. 1988. № 6. С. 52–56.
- Способ деполимеризации термореактивного связующего изоляции электрических машин : пат. № 2077104 Рос. Федерация / В. Г. Власов, В. Л. Иванов, Т. О. Мохова ; № RU 2 077 104 C1 ; заявл. 10.04.1997.
- Хикс Г. Основные принципы планирования эксперимента. М. : Мир, 1967. 406 с.
- Хомутов С. О., Кобозев Е. В., Семичевский П. И. Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов // *Ползуновский вестник*. 2009. № 1–2. С. 209–214.
- Худоногов, А. М., Оленцевич Д. А., Сидоров В. В., Лыткина Е. М. Анализ надежности изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава с учетом особенностей климатических условий внешней среды // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2009. № 2. С. 232–236.
- Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М. : Мир, 1972. 381 с.
- Finley W. R., Hodowanec M. M., Holter W. G. An analytical approach to solving motor vibration problems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2000. Vol. 36, Iss. 5. P. 1467–1480.
- Mukerji S. K., Khan A. S. *Electromagnetics for electrical machines*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 421 p.

References

- Avilov, V. D., Abrahamyan, A. A. 2006. Modeling of electromagnetic processes in isolation. *Mezhvuzovskiy tematicheskii sbornik nauchnykh trudov*. Omsk. (In Russ.)
- Agranat, B. A., Dubrovin, M. N., Khavsky, N. N. 1987. Fundamentals of physics and ultrasound technology. Moscow. (In Russ.)
- Baremba, K. N., Bernstein, L. M. 1961. Drying, impregnation and compounding of windings of electric machines. Moscow. (In Russ.)
- Gashimov, M. A., Abuladze, S. C. 2004. Research to diagnose the physical processes of functioning of electrical machines fault in the stator winding and rotor. *Elektrotekhnika*, 2, pp. 20–27. (In Russ.)
- Osadchenko, A. A., Rapoport, O. L., Tsubuklin, A. B., Shcherbatov, V. V. 2006. Forecasting resource traction motors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 3, pp. 14–16. (In Russ.)
- Pavlovich, S. N., Firago, B. I. 2009. Repair and maintenance of electrical equipment. Minsk. (In Russ.)
- Sokolov, V. V., Tsurpal, S. V., Konov, Yu. S., Korolenko, V. V. 1988. Determination of deformations of windings of large power transformers. *Elektricheskie stanstii*, 6, pp. 52–56. (In Russ.)
- Vlasov, V. G., Ivanov, V. L., Mokhova, T. O. Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof Electrical Machines. 1997. Method of depolymerization of thermosetting binder insulation of electrical machines, Russian Federation, Pat. 2077104. (In Russ.)
- Hicks, G. 1967. Basic principles of experiment planning. Moscow. (In Russ.)
- Khomutov, S. O., Kobozev, E. V., Semichevsky, P. I. 2009. Improving the efficiency of restoring the insulation of electric motors based on a comprehensive assessment of influencing factors. *Polzunovskiy vestnik*, 1–2, pp. 209–214. (In Russ.)
- Hudonogov, A. M., Olentsevich, D. A., Sidorov, V. V., Lytkina, E. M. 2009. Analysis of the insulation resistance of windings of electrical machines for traction rolling stock taking into account peculiarities of the climatic conditions of the environment. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2, pp. 232–236. (In Russ.)
- Schenk, H. 1972. Theory of engineering experiment. Moscow. (In Russ.)
- Finley, W. R., Hodowanec, M. M., Holter, W. G. 2000. An analytical approach to solving motor vibration problems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(5), pp. 1467–1480.
- Mukerji, S. K., Khan, A. S. 2015. Electromagnetics for electrical machines. CRC Press, Taylor & Francis Group.

Сведения об авторах

Кашин Артем Иванович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский государственный технический университет, аспирант;
e-mail: kashin-tema@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9303-3973>

Artem I. Kashin – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, PhD Student; e-mail: kashin-tema@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9303-3973>

Немировский Александр Емельянович – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000;
Вологодский государственный университет, д-р техн. наук; e-mail: a.e.nemirovsky@mail.ru

Alexander E. Nemirovsky – 15 Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Dr Sci. (Engineering); e-mail: a.e.nemirovsky@mail.ru