

УДК 620.9

Исследование влияния ультразвукового излучения на лаковые и компаундированные пропиточные составы при инновационном методе демонтажа обмоток электродвигателей

А. Е. Немировский, А. И. Кашин*

*Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: kashin-tema@mail.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
05.11.2020;

получена
после доработки
30.11.2020

В целях энергоэффективности, экологичности и меньших временных затрат на цикл ремонта электродвигателей в части выемки обмотки статора был исследован инновационный метод демонтажа обмоток на основе ультразвука. Метод показал себя как наиболее оптимальный с технической точки зрения в сравнении с существующими способами удаления обмотки. Данная статья является продолжением фундаментального исследования по освоению инновационного метода ремонта электродвигателей. Основной акцент сделан на материал, из которого изготовлена изоляция обмоток. Рассматриваются два вида изоляции: лаковая и компаундная – основные виды изоляции промышленных электродвигателей в нашей стране. В работе произведен анализ пропиточных электроизоляционных составов обмоток статора электродвигателей и изучено влияние на них ультразвука при демонтаже обмоток электродвигателей под воздействием различных факторов: продолжительность и мощность ультразвукового воздействия, концентрация и температура рабочего раствора. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью применяемого математического аппарата и методов математического моделирования, сходимостью результатов численного моделирования и натурных экспериментов. В статье смоделирована система уравнений и построены модели воздействия полезных факторов относительно друг друга, произведена оптимизация полученных результатов в ходе эксперимента и выявлены оптимальные параметры как лаковой, так и компаундной систем изоляции. Оптимальные параметры исследуемых типов изоляции показали обнадеживающие результаты по многим важным пунктам: продолжительность, энергозатратность, экологичность. Адекватность используемых математических моделей подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований процесса деполимеризации обмоток статора электродвигателей.

Ключевые слова:

ультразвук,
ремонт
электродвигателей,
демонтаж,
кавитация,
деполимеризация

Для цитирования

Немировский А. Е. и др. Исследование влияния ультразвукового излучения на лаковые и компаундированные пропиточные составы при инновационном методе демонтажа обмоток электродвигателей. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 4. С. 354–363. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-354-363.

Investigation of the effect of ultrasonic radiation on varnished and compounded impregnating compositions with an innovative method of dismantling electric motor windings

Alexander E. Nemirovsky, Artem I. Kashin*

*Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia;
e-mail: kashin-tema@mail.ru

Article info

Received
05.11.2020;

received
in revised
30.11.2020

Key words:

ultrasound,
motor repair,
dismantling,
cavitation,
depolymerization

Abstract

For the purposes of energy efficiency, ecology and less time for the cycle of repairing electric motors in the part of the excavation of the stator winding, an innovative method for dismantling ultrasound-based windings has been investigated. From a technical point of view the method has shown to be more optimal in comparison with existing methods of removing the winding. The paper is a continuation of fundamental research on the development of an innovative method of repairing electric motors. It is in this article that the main emphasis is placed on the material from which the insulation of windings is made. Lacquer and compound insulations have been considered being the main types of insulation of industrial electric motors in our country. The analysis of impregnating electrical insulation compositions of motor stator windings has been carried out; the ultrasound effect during the dismantling of motor windings at different levels of influencing factors has been studied, namely duration and power of ultrasonic action, concentration and temperature of the working solution. The validity of the scientific results obtained in the work is confirmed by the correctness of the applied mathematical apparatus and the methods of mathematical modeling, the convergence of the results of numerical modeling and full-scale experiments. A system of equations has been simulated and models of the effect of useful factors relative to each other have been built, the results obtained have been optimized during the experiment and the optimal parameters of both lacquer and compound insulation systems have been identified. The optimal parameters of the types of insulation under study have shown encouraging results on many important points compared to the existing ones: duration, energy consumption, and environmental friendliness. The validity of the conclusions regarding the adequacy of the mathematical models used has been confirmed by the results of experimental studies conducted in the framework of this work of the process of depolymerization of the electric motors' stator windings.

For citation

Nemirovsky, A. E. et al. 2020. Investigation of the effect of ultrasonic radiation on varnished and compounded impregnating compositions with an innovative method of dismantling electric motor windings. *Vestnik of MSTU*, 23(4), pp. 354–363. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-354-363.

Введение

Под воздействием многих негативных факторов ухудшаются эксплуатационные характеристики работы электродвигателей (ЭД). В агропромышленном комплексе к таким факторам относят повышенную влажность, некачественное электроснабжение и запыленность помещений, где установлены электродвигатели. Так, в сельскохозяйственном производстве ежегодный выход ЭД из строя достигает 20 % (*Хомутов и др., 2009*). В результате большая часть ЭД подвергается ремонту и дальнейшей перемотке. При этом важно, чтобы отремонтированный ЭД соответствовал требованиям надежности и эффективности в работе подобно новому. Вместе с тем, как показывает практика, эксплуатационный срок службы ЭД, подвергшегося перемотке, значительно ниже срока службы нового двигателя. Связано это в основном с качеством ремонта и применяемых материалов. При ремонте большое влияние на качество отремонтированного ЭД оказывает ремонт статора, а именно способ демонтажа сгоревшей обмотки. Деформации обмотки происходят при изменении температуры, электродинамических усилиях, вибрациях ЭД, что приводит к развитию внутренних напряжений в изоляции (особенно в межвитковой). Следствием является усталостный эффект с последующим повреждением изоляции.

Надежность изоляции определяется свойствами электроизоляционных материалов, к которым относится и пропитывающий состав обмотки статора ЭД. Пропитывающий состав обмотки статора замедляет процессы теплового старения и увлажнения изоляции, заполняет дефекты лакового покрытия проводов, цементирует обмотку, что сопровождается повышением срока "жизни" системы изоляции ЭД. В настоящее время для пропитки обмоток ЭД используются различные лаки (МЛ-92, БТ-987, ГФ-95) и компаунды (КП-303, Элпласт-180, Элком КП-11 и др.). Вместе с тем ЭД периодически приходится ремонтировать и при этом демонтировать "сгоревшую" обмотку.

В своей работе Немировский А. Е. с соавторами утверждают, что известные на сегодняшний день методы не экологичны и связаны с большими энергозатратами, к тому же приводят к механическим повреждениям пластин пакета статора, ухудшению магнитных свойств стали, росту тока холостого хода, повышенному потреблению электроэнергии, снижению КПД, локальным перегревам стали, уменьшению ресурса эксплуатации ЭД, вредному влиянию на эксплуатационный персонал и на окружающую среду и т. д. (*Немировский и др., 2019б*). Таким образом, разработка инновационной технологии демонтажа неисправных обмоток ЭД является крайне актуальной.

Данная статья продолжает цикл публикаций, посвященных проблемам ремонтов электродвигателей с помощью ультразвукового излучения (*Немировский и др., 2017а; 2019а; 2019б; Кашин и др., 2018; Кашин, 2016; Nemirovskiy et al., 2019*). В работе основное внимание уделяется анализу влияния воздействующих факторов используемых видов изоляции электродвигателей.

Материалы и методы

В ходе исследований проведен статистически спланированный эксперимент для определения оптимальных параметров процесса демонтажа обмоток статора ЭД, пропитанных лаком МЛ-92 и компаундом КП-303. Технология метода защищена патентом на изобретение и формулируется следующим образом: "Способ деполимеризации системы изоляции электродвигателей ультразвуковым излучением" (*Способ..., 2019*). Процесс происходит по следующей схеме: статор, подвергаемый ремонту, помещается в ультразвуковую ванну с рабочим раствором – водным раствором едкого натра. Ультразвуковая ванна представляет собой резервуар со встроенными в его днище пьезокерамическими излучателями. Действие ультразвука в водном растворе сопровождается возникновением парогазовых пузырьков, которые нелинейно пульсируют и схлопываются у обрабатываемой поверхности с образованием ударных волн и кумулятивных струй высокого давления. Благодаря действию кавитации происходит активное перемешивание рабочего раствора, что позволяет ускорить процесс обработки (*Немировский и др., 2015*). Капиллярный эффект при воздействии ультразвукового излучения усиливается. Рабочий раствор проникает в самые труднодоступные места в толще изоляции пазов статора и пазовой коробочки. Совокупность кавитационного и капиллярного эффектов значительно сокращает время обработки статора ремонтируемого электродвигателя.

Сравнение технических параметров лака МЛ-92 и компаунда КП-303 производится в ходе экспериментов по исследованию метода демонтажа и заключается в выявлении и сравнении полученных оптимальных параметров процесса извлечения "сгоревших" обмоток ЭД (табл. 1).

В работе (*Кашин и др., 2018*) авторы при анализе электрофизических характеристик пришли к выводу, что изменение технических характеристик пропиточных электроизоляционных составов способно менять оптимальные параметры процесса удаления "сгоревшей" обмотки статора из пазов ремонтируемого ЭД. Сравнив твердость покрытия лака МЛ-92 и компаунда КП-303, мы видим, что оптимальные параметры будут различаться в сторону увеличения при переходе к компаунду КП-303.

Закономерности и суть методики разрушения компаундированной пропитки ЭД под влиянием УЗИ раскрываются при анализе процесса удаления компаундированной системы изоляции обмотки как объекта исследования. Эти закономерности являются предметом исследований. Главная цель исследований – дать обоснование режимов процесса, при которых разрушение электрической изоляции проходит с минимальными временными и экономическими затратами, а также определить основные различия с методом демонтажа статорных обмоток, пропитанных лаком МЛ-92.

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

Показатель Марка	Ед. изм.	Лак МЛ-92	Компаунд КП-303
Документ	–	ГОСТ 15865-70 ¹	ТУ 2257-019-31995305-2003 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

Исследование процесса разрушения электрической изоляции включает в себя построение математической модели. Методы математического планирования основываются на аналитической связи между факторами и откликом эксперимента, где определяется область оптимальных значений (максимальные и минимальные точки) параметров по анализу формы поверхности отклика. Такие методы позволяют получить нужную информацию и сократить временные затраты на решение задач. Для решения взаимосвязанных задач деполимеризации и кавитационного эффекта в исследовании используются: 1) активный статистически спланированный эксперимент, проанализированный и обработанный в программном обеспечении РТС Mathcad, 2) физика ультразвука, 3) теория оптимизации функции нескольких переменных и 4) математическая статистика.

Исследования проводились при изменении концентрации раствора NaOH, его температуры, длительности воздействия УЗИ на статорет. За минимальную температуру выбрана температура окружающей среды 20 °С, за максимальную – 70 °С, так как при большем нагреве идет процесс естественной кавитации. Максимальная концентрация раствора – 10 %. Для уменьшения уровня воздействия на экологию и обслуживающий персонал исследовалась минимальная концентрация 2 % (табл. 2).

Проведение экспериментов записывается в виде матрицы планирования опытов, которая зависит от числа воздействующих факторов и уровней каждого фактора. Мы использовали матрицу со звездными точками с тремя уровнями варьирования четырех воздействующих факторов (Хукс, 1967).

В качестве экспериментальных образцов изготовлены статореты (рис. 1).

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

Независимые переменные	Условное обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		–1	0	+1	
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

За функции отклика приняты механические характеристики: остаточная прочность, остаточная склеиваемость и сила выдергивания обмотки из пазов. Для снятия механических характеристик использовались опытные образцы (статореты) и лабораторный стенд (рис. 1, 2).

При создании статоретов максимально сохранялись физико-механические свойства статора ЭД. Статореты выполнены из профильной трубы с медной обмоткой из провода ПЭТВ-2 (120 витков, диаметр – 1 мм). В качестве материала для пазовой изоляции применили синтокартон. Лобовая часть статоретов

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

² ТУ 2257-019-31995305-2003. Пропиточный компаунд КП 303 Н. ЗАО "Диэлектрик", 2003.

обмотана хлопчатобумажным биндажом для прочности. Весь макет статорной обмотки пропитан либо лаком МЛ-92, либо компаундом КП-303.



Рис. 1. Опытный образец (статорет)
Fig. 1. Prototype (stator winding)



Рис. 2. Лабораторный стенд
Fig. 2. Laboratory stand

Лабораторный стенд (Немировский и др., 2017б) позволяет исследовать влияние разрушающих факторов на пропитку обмотки ЭД. Уровень воздействия разрушающих факторов меняется в каждом проводимом опыте, "хаотично" разрушая пропитку обмотки ЭД.

С помощью лабораторного стенда исследуется влияние воздействующих факторов на пропитку "сгоревшей" статорной обмотки электродвигателя при различных уровнях варьирования. Варьирование уровней факторов дает различную степень разрушения пропиточного состава обмотки, охватывая в динамике весь процесс исследования.

На стенде можно получать три вида зависимостей³:

1. Остаточная прочность. Зависимость величины прогиба (мм) лобовой части опытного образца (статорета) от силы (кН) воздействия.

2. Остаточная склеиваемость. Зависимость величины прогиба (мм) толщи статорной обмотки лобовой части макета статора от силы (кН) воздействия на нее.

3. Сила выдергивания статорной обмотки из пазов (кН).

Для измерения усилия воздействия на макет статора используется электронный динамометр (ДЭПЗ-1Д-1У-1). Величина прогиба измеряется индикатором часового типа (ИЧ-10).

Снятие механических характеристик начинается с калибровки измерительных приборов (на положение "0"), осмотра стенд-установки на механические повреждения и регулировки креплений, троса и столика динамометра. Для каждой снимаемой характеристики имеется сменная насадка (рис. 3) и свой индентор (рис. 4).

Для насадок № 1 и 3 крепится ИЧ-10, на насадке № 2 применение ИЧ-10 не предусмотрено.

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

Индентор ввинчивается в натяжной механизм, который накидывается на крюк динамометра, и далее крепится на опытный образец (статорет). Трос натягивается при помощи ручного рычага.

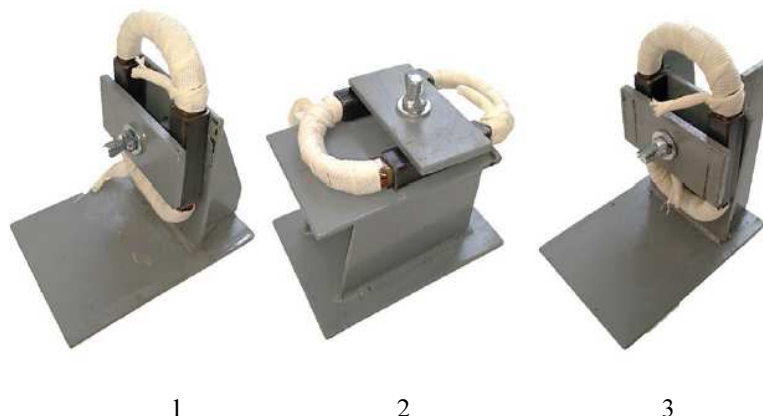


Рис. 3. Сменные насадки для снятия: 1 – остаточной прочности лобовой части обмотки ЭД; 2 – характеристики усилия выдергивания статорной обмотки из паза; 3 – остаточной склеиваемости витков обмотки между собой
 Fig. 3. Replaceable tips: 1 – for removing residual strength of the frontal part of the EM winding; 2 – for removing characteristics of the force of pulling the stator winding out of the slot; 3 – for removing residual adhesion of the winding turns to each other

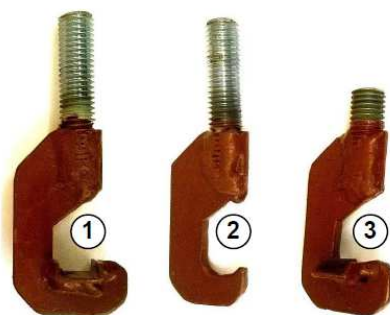


Рис. 4. Инденторы: 1 – для остаточной прочности; 2 – для снятия остаточной склеиваемости витков статорной обмотки между собой; 3 – для определения усилия выдергивания обмотки из паза
 Fig. 4. Indentors: 1 – for residual strength; 2 – to remove the residual adhesion of the stator winding turns to each other; 3 – to determine the pulling force of the winding from the slot

Результаты и обсуждение

Математические модели (1) и (2) разрушения обмотки сгоревшего ЭД с целью ее дальнейшего "легкого" демонтажа получены в результате эксперимента. Значимость коэффициентов регрессии проверены по критерию Стьюдента, адекватность модели – по критерию Фишера, воспроизводимость опытов – по критерию Кохрена (Немировский и др., 2019а).

Уравнение регрессии для функции остаточной прочности:

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

Уравнение регрессии для функции остаточной склеиваемости:

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

Из уравнений (1) и (2) видно, что наибольший вклад в разрушение монолитности лаковой пропитки обмотки ЭД оказывает продолжительность воздействия факторов X_2 , X_3 , X_4 . При этом значение фактора X_1 можно уменьшить в несколько раз по сравнению со значением этого фактора в существующих методах демонтажа и тем самым добиться сокращения времени демонтажа обмотки ЭД. Факторы температуры раствора NaOH X_2 и мощности УЗИ X_3 также весьма значимы и вносят примерно одинаковый вклад

в размягчение обмотки ЭД. Концентрация NaOH X_4 , т. е. химически активная среда, меньше всего влияет на процесс демонтажа обмотки ЭД, что весьма важно, поскольку дает возможность значительно уменьшить экологический ущерб и сохранить здоровье обслуживающего персонала. В нашем случае удалось уменьшить концентрацию NaOH почти в 2 раза.

В работе (Немировский и др., 2019а) доказано, что положительный знак коэффициентов регрессии взаимодействия двух, трех, четырех факторов не имеет физического смысла (показывает неоднородность, неравномерность анализируемой функции).

Для получения оптимальных параметров воздействующих факторов на процесс разрушения обмотки сгоревшего ЭД находим частные производные от каждого фактора и решаем полученную систему уравнений для каждой функции отклика:

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

Решив систему уравнений (3), имеем в относительных единицах:

– для остаточной прочности: $X_1 = 1,024$; $X_2 = 1,03$; $X_3 = 0,525$; $X_4 = 0,738$.

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

В именованных единицах:

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

$$X_2 = \frac{X_2^{\text{н}} - X_2^0}{\Delta X_2}; \quad (5)$$

$$X_3 = \frac{X_3^{\text{н}} - X_3^0}{\Delta X_3}; \quad (6)$$

$$X_4 = \frac{X_4^{\text{н}} - X_4^0}{\Delta X_4}; \quad (7)$$

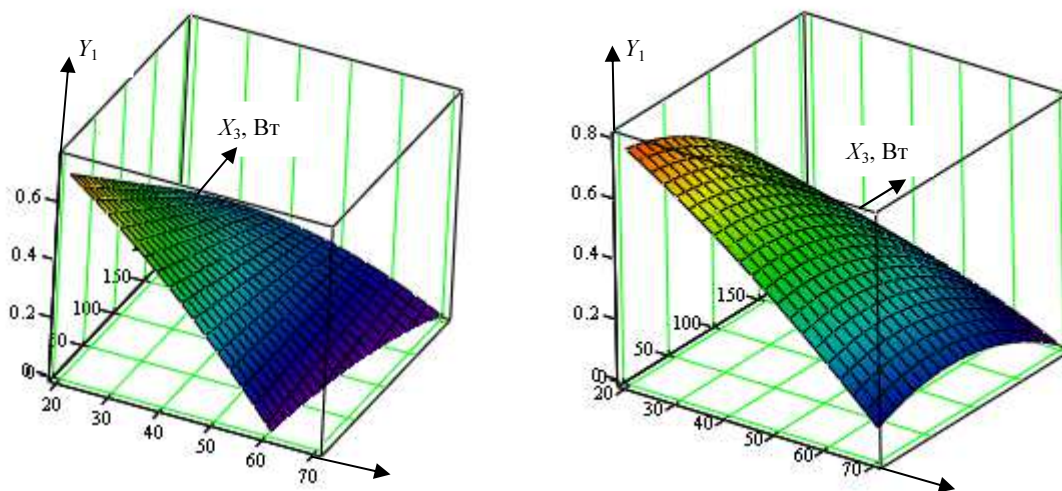
где $X_1^{\text{н}}, X_2^{\text{н}}, X_3^{\text{н}}, X_4^{\text{н}}$ – именованные значения факторов; $X_1^0, X_2^0, X_3^0, X_4^0$ – значения нулевого уровня варьирования факторов; $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \Delta X_4$ – интервалы варьирования факторов (Немировский и др., 2019а).

С учетом выражений (4–7) получены оптимальные значения X_1, X_2, X_3, X_4 в именованных единицах для процесса наиболее эффективного демонтажа обмоток ЭД с лаковой пропиткой с помощью УЗИ. В табл. 3 приведены оптимальные значения факторов, при которых остаточные прочность и склеиваемость обмотки ЭД минимальны. При этом оптимальная температура раствора NaOH на 30 % ниже температуры, характерной для метода выщелачивания (Способ..., 1997). Это дает возможность не только снизить энергозатраты при разработанном способе демонтажа обмоток ЭД, но и сохранить изоляцию между пластинами, а также электрофизические характеристики стали статора за счет уменьшения проникновения молекул NaOH в пространство между пластинами магнитопровода.

Таблица 3. Оптимальные параметры (лаковая пропитка)
Table 3. Optimum parameters (lacquer impregnation)

Факторы	Минимальные значения остаточной прочности	Минимальные значения остаточной склеиваемости
$X_1^{\text{н}}$, мин	171	159
$X_2^{\text{н}}$, °C	50,45	50
$X_3^{\text{н}}$, Вт	116,25	120
$X_4^{\text{н}}$, %	6,3	6,1

Из уравнений (1) и (2) получены частные уравнения регрессии, по которым на рис. 5 с использованием математического пакета Mathcad построены поверхности функций отклика для остаточной прочности и остаточной склеиваемости витков обмотки ЭД.



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

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

Рис. 5. Поверхности функций отклика: а – остаточная прочность при $X_1 = 171$ мин; $X_4 = 6,3$ %; б – остаточная склеиваемость при $X_1 = 159$ мин; $X_4 = 6,1$ %

Fig. 5. Surfaces of response functions: а – residual strength at $X_1 = 171$ min; $X_4 = 6.3$ %; б – residual adhesion at $X_1 = 159$ min; $X_4 = 6.1$ %

Для сравнения оптимальных параметров различных систем изоляции проведен такой же эксперимент для компаундированной системы изоляции. Результаты эксперимента представлены в табл. 4. Из уравнений (8) и (9) получены частные уравнения регрессии, по которым на рис. 6 построены поверхности функций отклика для остаточной прочности и остаточной склеиваемости витков обмотки ЭД.

Уравнение регрессии для функции остаточной прочности:

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

Уравнение регрессии для функции остаточной склеиваемости:

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

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

Факторы	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

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

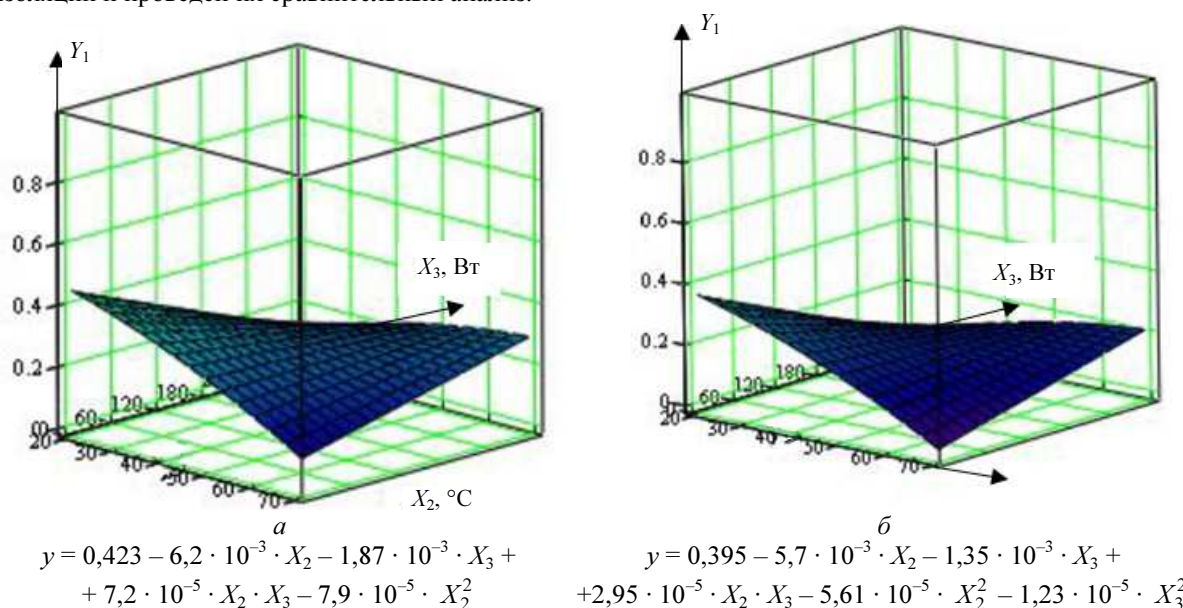


Рис. 6. Поверхности функций отклика: *a* – остаточная прочность при $X_1 = 30$ мин; $X_4 = 4,5$ %;
б – остаточная склеиваемость при $X_1 = 100$ мин; $X_4 = 4,5$ %
Fig. 6. Surfaces of response functions: *a* – residual strength at $X_1 = 30$ min; $X_4 = 4.5$ %;
б – residual adhesion at $X_1 = 100$ min; $X_4 = 4.5$ %

Таблица 5. Оптимальные параметры процесса демонтажа "сгоревших" обмоток ЭД для различных систем изоляции
Table 5. Optimal parameters of the process of dismantling the "burnt" EM windings for various insulation systems

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

При сравнении математических моделей (1) и (8), (2) и (9) для остаточной прочности обмоток электродвигателей и их оптимальных параметров выявлено, что на разрушение компаундированной пропитки значимое влияние оказывают факторы длительности воздействия и мощности УЗИ, а также температуры раствора NaOH. Отличительным моментом двух систем изоляции является различие в мощности ультразвукового излучения, температуре и концентрации раствора NaOH (Немировский и др., 2015).

В работе (Агранат и др., 1987) утверждается, что на развитие и интенсивность кавитации большое влияние оказывают внешние условия и свойства жидкости. При кавитации в дегазированной жидкости в кавитационные пузырьки поступает меньшее количество воздуха, чем в отстоявшейся, что приводит к уменьшению демпфирующего эффекта парогазовой смеси в пузырьке при его смыкании и возрастании давления в ударной волне. Дегазация жидкости приводит к уменьшению области кавитации с одновременным увеличением интенсивности ударной волны, создаваемой кавитационными пузырьками.

Согласно полученным нами результатам следует отметить, что при повышении температуры давление внутри пузырька, определенное давлением пара и газа, уменьшается, при этом ударная волна ослабляется. Это также приводит к росту кавитационной области. Увеличение температуры дает возможность уменьшить мощность ультразвукового излучения.

Также можно сказать, что плавное увеличение мощности УЗИ ведет к плавному увеличению кавитационного давления, что, в свою очередь, увеличивает радиус 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.

Заключение

В результате проведенных исследований можно утверждать, что электродвигатели с компаундированной системой изоляции возможно подвергать ремонту с применением ультразвукового излучения в более благоприятных условиях для экологии и эксплуатационного персонала (*Nemirovskiy et al., 2019*).

Также стоит отметить, что ультразвук по-разному влияет на пропиточные составы изоляции электродвигателей, так как деполимеризация пропиточного состава обмотки происходит под действием различных факторов, благодаря чему каждому типу изоляции соответствуют свои оптимальные параметры воздействующих факторов. Это необходимо для предотвращения нарушения электрофизических характеристик в послеремонтный период.

Благодарности

Работа выполнена в рамках подготовки и защиты кандидатской диссертации на тему повышения эффективности ремонтов электродвигателей с использованием ультразвукового излучения. Авторы благодарят начальника электроремонтного цеха ПАО "Северсталь" Гузейко И. Н. за проявленный интерес и содействие.

Библиографический список

- Агранат Б. А., Дубровин М. Н., Хавский Н. Н., Эскин Г. И. Основы физики и техники ультразвука. М.: Высш. шк., 1987. 352 с.
- Кашин А. И. Разработка ультразвуковой ванны для освоения инновационного метода демонтажа обмоток электродвигателей // Материалы Межрегиональной науч. конф. X ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых: [в 4 т.]. Вологда, 23 ноября 2016 г. Вологда: ВоГУ, 2016. Т. 1. С. 21–24.
- Кашин А. И., Немировский А. Е. Анализ свойств пропитывающих материалов обмотки статора при инновационной технологии демонтажа обмоток электродвигателей // Электронное научно-практическое периодическое издание "Современные научные исследования и разработки". 2018. № 11(28), т. 2. С. 306–310. URL: <http://olimpiks.ru/>.
- Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю. Оптимальные параметры светового потока, высоты подвеса и конфигурации источников света для уменьшения энергозатрат в бюджетных образовательных учреждениях // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2019а. № 2(56). С. 14–30.
- Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю., Иванов А. В. [и др.]. Анализ промышленных методов демонтажа "сгоревших" обмоток электродвигателей при ремонтах // Вестник Вологодского государственного университета. Сер.: Технические науки. 2019б. № 3(5). С. 64–67.
- Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю., Иванов А. В. [и др.]. Повышение эффективности демонтажа неисправных обмоток электродвигателей при ремонтах // Промышленная энергетика. 2017а. № 12. С. 32–39.
- Немировский А. Е., Петифоров В. О., Сергиевская И. Ю. Повышение эффективности ремонта обмоток электродвигателей // Вузовская наука – региону: материалы XIII Всерос. науч. конф., Вологда, 25 февраля 2015 г. Вологда: ВоГУ, 2015. С. 31–32.
- Немировский А. Е., Петифоров В. О., Сергиевская И. Ю., Кашин А. И. [и др.]. Установка для исследования выходных механических характеристик электродвигателей, подвергшихся ультразвуковой обработке // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XII Международной науч.-техн. конф., Вологда, 21 марта 2017 г. Вологда: ВоГУ, 2017б. С. 157–162.
- Способ деполимеризации системы изоляции электродвигателей ультразвуковым излучением: пат. 2018115276 Рос. Федерация / Кашин А. И., Немировский А. Е. № 2018115276; заявл. 25.04.2018; опубл. 28.10.2019, Бюл. № 31.
- Способ деполимеризации терморезистивного связующего изоляции электрических машин: пат. 2077104 Рос. Федерация / Власов В. Г., Иванов В. Л., Мохова Т. О. № 95 95107099; заявл. 03.05.1995; опубл. 10.04.1997.
- Хикс Г. Основные принципы планирования эксперимента / пер. с англ.; под ред. В. В. Налимова. 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. 220–229.
- Nemirovskiy A. E., Kashin A. I., Kosmach V. F., Titovet Yu. F. [et al.]. Innovative technology for dismantling the windings of electric motors using ultrasonic radiation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Efficient waste treatment – 2018, 13–14 December 2018, Congress Center of Peter the Great, St. Petersburg Polytechnic University, 2019. Vol. 337. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012071>.

References

- Agranath, B. A., Dubrovin, M. N., Khavsky, N. N., Eskin, G. I. 1987. Fundamentals of physics and technology of ultrasound. Moscow. (In Russ.)
- Kashin, A. I. 2016. Development of an ultrasonic bath for the development of an innovative method of dismantling the windings of electric motors. Proceedings of Interregional scientific conf. *X Annual scientific session of graduate students and young scientists*. In 4 vol., 23 November, 2016. Vologda, Vol. 1, pp. 21–24. (In Russ.)
- Kashin, A. I., Nemirovsky, A. E. 2018. Analysis of properties of impregnating materials of stator winding under innovative technology for dismantling electric motor windings. *Elektronnoye nauchno-prakticheskoye periodicheskoye izdaniye "Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki"*, 11(28), pp. 306–310. URL: <http://olimpiks.ru/>. (In Russ.)
- Nemirovsky, A. E., Kichigina, G. A., Sergievskaya, I. Yu. 2019a. Optimal parameters of light flux, suspension height and configuration of light sources to reduce energy consumption in budgetary educational institutions. *News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2(56), pp. 14–30. (In Russ.)
- Nemirovsky, A. E., Kichigina, G. A., Sergievskaya, I. Yu., Ivanov, A. V. et al. 2019b. Analysis of industrial methods of dismantling "burnt" windings of electric motors during repairs. *Bulletin of Vologda State University. Series: Technical Sciences*, 3(5), pp. 64–67. (In Russ.)
- Nemirovsky, A. E., Kichigina, G. A., Sergievskaya, I. Yu., Ivanov, A. V. et al. 2017a. Improving the efficiency of dismantling faulty windings of electric motors during repairs. *Promyshlennaya energetika*, 12, pp. 32–39. (In Russ.)
- Nemirovsky, A. E., Petiforov, V. O., Sergievskaya, I. Yu. 2015. Improving the efficiency of repairing electric motor windings. Proceedings of XIII All-Russian scientific conf. *University science – to the region*. 25 February, 2015. Vologda, pp. 31–32. (In Russ.)
- Nemirovsky, A. E., Petiforov, V. O., Sergievskaya, I. Yu., Kashin, A. I. et al. 2017b. Installation for studying the output mechanical characteristics of electric motors subjected to ultrasonic processing. Proceedings of XII Intern. scientific-techn. conf. *Automation and energy saving of machine-building and metallurgical industries, technology and reliability of machines, devices and equipment*. 21 March, 2017. Vologda, pp. 157–162. (In Russ.)
- Kashin, A. I., Nemirovsky, A. E. Vologda State University. 2019. Method of depolymerization of electric motor insulation system with ultrasonic radiation, Russian Federation, Pat. 2018115276. (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 binding 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 insulation of electric engines based on a comprehensive assessment of influencing factors. *Polzunovskiy vestnik*, 1–2, pp. 220–229. (In Russ.)
- Nemirovskiy, A. E., Kashin, A. I., Kosmach, V. F., Titovec, Yu. F. et al. Innovative technology for dismantling the windings of electric motors using ultrasonic radiation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Efficient waste treatment – 2018, 13–14 December, 2018, Congress Center of Peter the Great, St. Petersburg Polytechnic University, 2019. Vol. 337. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012071>.

Сведения об авторах

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

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

Кашин Артем Иванович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, аспирант; e-mail: kashin-tema@mail.ru

Artem I. Kashin – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Ph.D. Student; e-mail: kashin-tema@mail.ru