



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПИТЫВАЮЩИХ СОСТАВОВ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Использование инновационной технологии удаления неисправной обмотки ультразвуковым излучением (УЗИ) показало преимущество перед существующими методами демонтажа обмоток электродвигателей (ЭД). В основе метода лежат кавитационное воздействие ультразвуковых колебаний и капиллярный эффект, помогающий раствору едкого натра (NaOH) быстрее проникать в толщу электроизоляционной пропитки и способствовать разрушению изоляции изнутри. Рассмотрены несколько видов электроизоляционных материалов, наиболее распространенных в качестве пропитывающих составов обмотки ЭД. Даны теоретические выкладки математических зависимостей параметров разрушения пропитывающего состава.

Электродвигатель, ремонт, демонтаж обмоток, ультразвук, кавитация, изоляция.

В настоящее время электродвигатели (ЭД) являются крупнейшими потребителями электрической энергии. Согласно многим источникам, они потребляют свыше 80% всей вырабатываемой в стране электроэнергии. В процессе эксплуатации по многим причинам могут возникать повреждения элементов ЭД, что приводит к преждевременному выходу его из строя. Повреждения ЭД носят следующий характер [1]:

- подшипники – 40%;
- статор – 38%;
- ротор – 10%;
- другие повреждения – 12%.

Выход ЭД из строя наносит большой ущерб предприятиям агропромышленного комплекса и других отраслей промышленности. Специфика сельскохозяйственных предприятий связана с процессом жизнеобеспечения биологических объектов, металлургических комбинатов в выплавке металлопроката, и, следовательно, срыв технологических операций из-за отказа ЭД приводит к снижению производительности. Выход из строя ЭД приводит к простоям технологического оборудования и порче продукции. Помимо основного ущерба предприятию возможно возникновение дополнительных убытков – снижение уровней электро- и пожаробезопасности, связанных с возможными короткими замыканиями в обмотке статора или ротора поврежденного ЭД.

На основе статистических данных по отказам ЭД, полученных из различных исследуемых источников, построена диаграмма отказов, показанная на рисунке 1 и 2 [2]. Горизонтальными столбцами на ней представлен средний ресурс ЭД (математические ожидания). По технологическим процессам металлургического производства и отраслям сельского хозяйства обозначен расчетный ресурс, составляющий согласно нормам амортизационных отчислений не менее 8 лет. Как видно из рисунков 1, 2 действительный средний ресурс ЭД ниже расчетного в 2,5...3,5 раза. При этом ЭД, срок службы которого превышает математическое ожидание, может рассматриваться как обработавший повышенный ресурс.

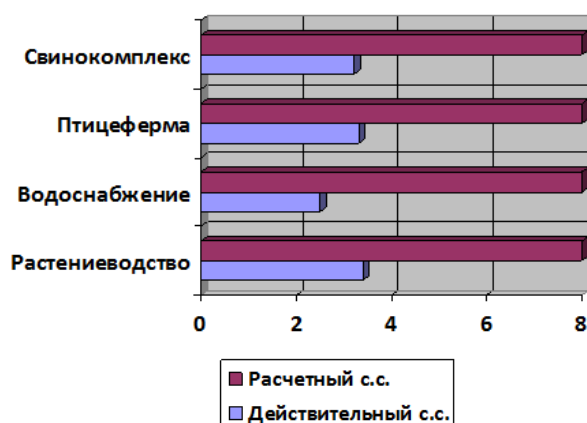


Рис. 1. Срок службы ЭД в агропромышленном комплексе

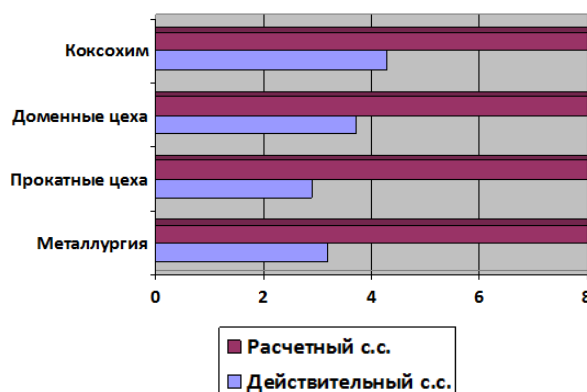


Рис. 2. Срок службы ЭД в металлургическом производстве

Назначение изоляции обмоточных проводов – предупреждение междувитковых замыканий. В асинхронных двигателях низкого напряжения междувитковое напряжение обычно составляет несколько вольт. Однако при включениях и выключениях возникают кратковременные импульсы перенапряжений, поэтому изоляция должна иметь большой запас элек-

трической прочности. Появление ослабления в одной точке может вызвать электрический пробой и повреждение всей обмотки. Пробивное напряжение изоляции обмоточных проводов должно составлять несколько сот вольт. Обмоточные провода обычно изготавливают с волокнистой, эмальволокнистой и эмалевой изоляцией. Волокнистые материалы на основе целлюлозы обладают значительной пористостью и высокой гигроскопичностью. Для повышения электрической прочности и влагостойкости волокнистую изоляцию пропитывают специальным лаком. Однако пропитка не предохраняет от увлажнения, а лишь снижает скорость поглощения влаги. Из-за этих недостатков провода с волокнистой и эмальволокнистой изоляцией в настоящее время почти не применяют для обмоток электрических машин. В период эксплуатации изоляция подвергается воздействию различных факторов, влияющих на ее характеристики. Главными из них следует считать нагрев, увлажнение, механические усилия и химически активные вещества в окружающей среде.

Межвитковая изоляция является слабым элементом конструкции низковольтных ЭД. Ее уязвимость обусловлена вхождением в механическую систему, состоящую из разнородных элементов:

- полимерные изоляционные материалы;
- медь проводников.

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.

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), компаунды (КП-303, Элпласт-180, Элком КП-11 и др.). Вместе с тем, ЭД периодически приходится ремонтировать. Ремонт ЭД связан прежде всего с демонтажем «сгоревшей» обмотки. Существующие методы демонтажа обмоток имеют много недостатков, связанных с экологичностью, энергоэффективностью, производительностью, безопасностью персонала.

В настоящее время ведутся исследования по освоению инновационного метода демонтажа обмоток ЭД на основе ультразвукового излучения [3,4,5]. В ходе исследований проведен статистически спланированный эксперимент для определения оптимальных параметров процесса демонтажа обмоток статора ЭД, пропитанных лаком МЛ-92.

Для раскрытия сущности и основных закономерностей разрушения лаковой пропитки ЭД под воздействием ультразвуковых явлений в качестве объекта исследований рассматривался процесс удаления пропиточного лака обмоток статора ЭД. Предметом исследований являлись закономерности процесса разрушения пропитки обмоток ЭД. Основная цель ис-

следования – это обосновать режимы процесса, при которых разрушение изоляции сгоревшего ЭД происходит быстро и экономически эффективно.

Введение ультразвуковых колебаний в моющий раствор позволяет не только ускорить процесс демонтажа обмотки ЭД, но и уменьшить ручной труд, уменьшить количество пожароопасных и токсичных растворителей.

Эффективность процесса кавитации зависит от многих параметров. Прежде всего, это частота и интенсивность ультразвука. Существенное влияние оказывают физико-химические показатели растворителя: поверхностное натяжение, вязкость, упругость насыщенного пара, плотность, газосодержание. Важное значение так же имеют внешние факторы: температура и гидроскопическое давление.

В процесс ультразвуковой технологии входят основные эффекты, проявляющиеся в мощных ультразвуковых полях: звуковое давление, кавитация, акустические потоки, звукокапиллярный эффект, радиационное давление. Наиболее существенное влияние на процесс очистки оказывает ультразвуковая кавитация, возникающая в жидкости при воздействии мощных ультразвуковых полей. Явление кавитации заключается в образовании микровзрывов в жидкости. Причиной разрывов являются переменные давления, создаваемые в объеме жидкости источником ультразвуковых колебаний.

В процессе ультразвуковой очистки микроударное действие захлопывающихся пузырьков способствует разрушению «сгоревшей» изоляции, а пульсирующие пузырьки проникают в капилляры и микропоры изоляции, способствуя процессу растворения и разрушения.

Выбор активного вещества определяется системой изоляции. Для разрушения кавитационно-стойких, прочно связанных с твердой изоляцией и химически взаимодействующих с моющей жидкостью электроизоляционных лаков, необходимо использовать водные щелочные растворы.

В основу теоретических исследований положена система дифференциальных уравнений переноса массы и энергии [6], решения которой применительно к рассматриваемому случаю представляют интерес с точки зрения разработки метода разрушения пропиточного состава изоляции обмотки ЭД с помощью ультразвукового излучения.

Химическая реакция между агрессивной средой и химически нестойкими связями полимера может происходить на границе раздела фаз и в объеме фазы полимера. Считая обе фазы единой замкнутой системой, скорость химической реакции W можно выразить [6]:

$$W = \frac{dC_n}{dt} = k(C_n^0 - C_n)C_{кат}C_{раст}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_{раст}}{\partial t} = D_{раст} \nabla^2 C_{раст} - k(C_n^0 - C_n)C_{кат}C_{раст}; \quad (2)$$

$$\frac{dC_{кат}}{dt} = D_{кат} \nabla^2 C_{кат} - \sum_i C_{кат} C_i k_i, \quad (3)$$

где n – число распавшихся связей в момент времени t ;
 C_n^0 – начальная концентрация химически нестойких связей в полимере;

C_n – концентрация распавшихся связей;

$C_{кат}$ – концентрация катализатора в полимере;

$C_{раст}$ – концентрация растворителя;

k – константа скорости распада;

∇ – оператор Лапласа;

$D_{кат}, D_{раст}$ – коэффициенты диффузии катализатора и растворителя.

Решение зависимостей (1)-(3) при условии, что соблюдается закон действия масс, объем полимера в ходе деструкции практически не изменяется и полимер изотропен [6], позволило оценить степень воздействия агрессивных сред на изоляцию обмотки в условиях эксплуатации, определить скорость ее старения и создать предпосылки к отысканию показателей интенсификации разрушения связующего электроизоляционной пропитки в ходе ремонта обмотки ЭД.

Аналитическая задача установления связи между временными и пространственными изменениями потенциалов переноса при разрушении связующего обмоток формулируется на основе системы дифференциальных уравнений молярно-молекулярного тепло-массопереноса. Тогда в целях упрощения решения общей системы уравнений (1)-(3) можно записать:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial \tau} = D \nabla^2 U + D \nabla^2 p \partial_p \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 p \end{cases}, \quad (4)$$

где τ – время;

p – давление;

U – концентрация вещества;

∂_p – относительный коэффициент потока паровой влаги;

a_p – коэффициент конвективной диффузии;

∇ – оператор Гамильтона.

Использование теории подобия позволяет перейти к безразмерной форме записи системы уравнений (4), а на основе принятых в [6] допущений возможен переход и к одномерной форме записи:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + Pn \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \\ \frac{\partial p}{\partial F_0} = Lu \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \end{cases}, \quad (5)$$

при различных граничных условиях (к примеру):

$$P(1, F_0) = P_d F_0; \quad (6)$$

$$-\frac{\partial U(1, F_0)}{\partial x} + Bi[1 - U(1, F_0)] + P(1, F_0) = 0, \quad (7)$$

где U и P – безразмерные потенциал массопереноса и давление;

Lu – критерий Лыкова;

Pn – критерий Поснова;

F_0 – критерий Фурье;

X – безразмерная координата;

Pd – массообменный критерий Предводителяева;

Bi – критерий Био.

Описание процесса нахождения решения данной системы дифференциальных уравнений достаточно громоздко. Решением данной системы уравнений, а именно связь между безразмерными величинами концентрации вещества и давления выглядит следующим образом:

$$U = \frac{PnLu}{Lu^2 - 1} P + 1. \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что для качественного разрушения электроизоляционного материала необходимо увеличивать градиент давления и критерий Поснова, который характеризует перепад потенциала массопереноса, вызванный разностью температур или разностью давлений. При этом жидкости даже не смачивающие поверхность твердого тела могут проникать в поры, каналы и капилляры обмотки ЭД под действием градиента давления. Создать градиент давления возможно за счет ультразвукового излучения пьезокерамических излучателей в водном растворе едкого натра.

Для различных систем изоляции, пропитанных лаком или компаундом, разрушение «сгоревшей» обмотки ЭД реализуется четырьмя факторами: температурой и концентрацией раствора NaOH, мощностью и продолжительностью воздействия ультразвукового излучения. При этом параметры факторов будут различными в виду того, что лаки и компаунды имеют различные электрофизические характеристики.

В таблице 1 приведены электрофизические характеристики электроизоляционных пропиточных составов некоторых лаков: МЛ-92, с которым уже проведены исследования и получены оптимальные параметры демонтажа обмоток статора ЭД; ГФ-95 и компаунда КП-303, для которых в дальнейшем будут найдены оптимальные параметры аппаратного комплекса для их разрушения с целью облегчения демонтажа обмотки ЭД. Компаунд КП-303 и лак ГФ-95 широко используются в качестве пропиточного состава обмоток при изготовлении и ремонте ЭД.

Таблица

Сравнение электрофизических характеристик пропиточных составов

Показатель/Марка	Ед.изм.	ГФ-95	МЛ-92	КП-303
Документ	-	ГОСТ 8018-70	ГОСТ 15865-70	ТУ2257-019-31995305-2003
Кислотное число	Мг*КОН	12	10	-
Класс нагревостойкости		В (130 ⁰ С)	В (130 ⁰ С)	Н(180 ⁰ С)
Твердость покрытия по маятниковому прибору типа М-3, не менее (при 20±1 ⁰ С)	Усл.ед.	0,42	0,40	0,71
Маслостойкость пленки, не менее	Ч.	59	78	-
Электрическая прочность пленки, не менее (при 20±2 ⁰ С)	МВ/м	45	45	25

Анализируя таблицу, делаем вывод, что изменение технических характеристик пропиточных электроизоляционных составов поменяет также оптимальные параметры процесса удаления «сгоревшей» обмотки статора из пазов ремонтируемого ЭД. Сравнив твердость покрытия лака МЛ-92 и компаунда КП-303, видим, что оптимальные параметры будут различаться в сторону увеличения при переходе к компаунду КП-303.

Для лаковой пропитки при проведении статистически спланированного эксперимента определены оптимальные параметры технологического процесса удаления «горевшей» обмотки ЭД и построены поверхности функций отклика прочностных характеристик обмотки: остаточной прочности и склеиваемости витков обмотки между собой (рис. 3, 4).

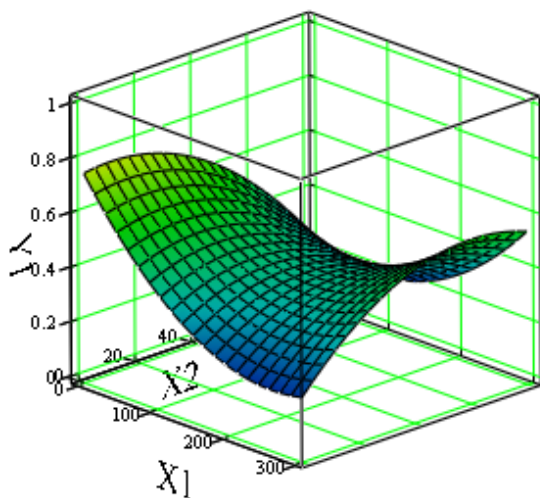


Рис. 3. Поверхность функции отклика (остаточная прочность)

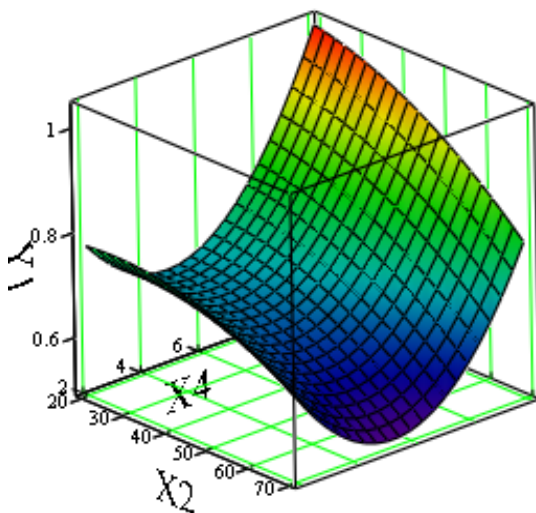


Рис. 4. Поверхность функции отклика (склеиваемость)

На рисунке 3 показана поверхность отклика при следующих фиксирующих факторах: мощность воздействия ультразвука $X_3=90$ Вт; концентрация $X_4=2$ % NaOH. Анализ данной поверхности показал, что экс-

тремум возможен при продолжительности $X_1=200$ мин; температуре $X_2=53$ °С. На рисунке 4 показана поверхность отклика при следующих фиксирующих факторах: продолжительность воздействия $X_1=30$ мин; мощность воздействия ультразвука $X_3=90$ Вт. Анализ данной поверхности показал, что экстремум реализуется при температуре воздействия $X_2=58$ °С; концентрации раствора $X_4=6,3$ % NaOH. Окончательные параметры процесса демонтажа «сгоревшей» обмотки ЭД получают при дальнейшей обработке данных эксперимента.

После проведения статистически спланированного эксперимента на статоре с компаундированной обмоткой будут определены оптимальные параметры процесса разрушения пропиточного состава, построены поверхности функции отклика (прочностные характеристики обмотки). Для демонтажа обмоток ЭД с различными системами изоляции будет разработан универсальный аппаратный комплекс, в который заложены режимы работы с различными оптимальными параметрами для демонтажа неисправных обмоток. С помощью разработанных аппаратных комплексов будет реализована новая технология демонтажа на крупных промышленных предприятиях Российской Федерации.

Литература

1. Хомутов, С. О. Система повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции: дис. ... д-ра техн. наук / С. О. Хомутов. – Барнаул, 2010. – 430 с.
2. Сташко, В. И. Методы диагностики изоляции электрических машин: учеб. пособие / В. И. Сташко, Г. В. Суханкин, Н. Т. Герцен. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2006. – 204 с.
3. Повышение эффективности демонтажа неисправных обмоток электродвигателей при ремонтах / А. Е. Немировский, А. И. Кашин, Г. А. Кичигина, А. В. Иванов, И. Ю. Сергиевская, Л. Е. Старкова // Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 32–39.
4. Исследование инновационного метода ремонта электродвигателей / А. Е. Немировский, А. И. Кашин, Г. А. Кичигина, О. М. Никифорова // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы 11 междунар. науч.-техн. конф., 21 марта 2017 г. / [отв. ред. В. А. Раков]. – Вологда, 2017. – С. 144–149.
5. Поисковые исследования процесса демонтажа обмоток электродвигателей при ремонтах / Д. О. Аксёнов, А. И. Кашин, А. Е. Немировский, В. О. Петифоров, И. Ю. Сергиевская // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV рос. молодежной науч. школы-конф.: в 2 т. Т. 1. – Томск: Изд-во «ЦРУ», 2016. – С. 161–163.
6. Хомутов, С. О. Электротермовакuumная пропитка и сушка электродвигателей / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов. – Новосибирск: Наука, 2006. – 325 с.

A.E. Nemirovsky

Vologda State University, Vologda, Russia

A. I. Kashin

Murmansk state technical University, Murmansk, Russia

RESEARCH OF ISOLATION IMPREGNANT OF ELECTRIC MOTOR WINDING

The use of innovative technology of removal of faulty winding by ultrasonic radiation (ultrasound) showed an advantage over the existing methods of dismantling the windings of electric motors (ED). The method is based on the cavitation effect of ultrasonic vibrations and the capillary effect, which helps the caustic soda solution (NaOH) to penetrate faster into the thickness of the insulating impregnant and contribute to the destruction of the insulation from the inside. Several types of electrical insulating materials, the most common as impregnating compositions of the winding, are considered. Theoretical description of mathematical relations of impregnant decomposition parameters is given.

Electric motor, repair, dismantling of windings, ultrasound, cavitation, insulation.