

На правах рукописи



Супуева Аделя Сагынбековна

**СНИЖЕНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ
ОБМОТОК НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.02 –
«Электротехнические материалы и изделия»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Леонов Андрей Петрович

Официальные оппоненты: **Смирнов Геннадий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск), профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга, директор НИИ электронного технологического оборудования и систем связи.

Воробьев Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул), профессор кафедры электрификации производства и быта.

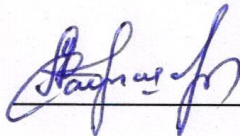
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита диссертации состоится «12» октября 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «23» августа 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Низковольтные асинхронные электродвигатели – наиболее распространенный и широко применяющийся тип электрических машин. Статистические данные об их эксплуатации показывают, что надежность этих изделий все ещё остается недостаточно высокой: ежегодно в среднем капитальному ремонту подвергается 20-25 % от общего количества установленных двигателей, значительная часть которых выходит из строя по причине отказа системы изоляции. В связи с этим вопрос о повышении качества и надежности этих устройств имеет на сегодняшний день особое значение.

Частыми причинами выхода из строя системы изоляции асинхронных электродвигателей являются неудовлетворительное качество применяемых эмалированных проводов и электроизоляционных материалов, несовершенство и нарушение технологического процесса обмоточно-изолирующих работ, а также несоответствие режимов эксплуатации. В подавляющем большинстве случаев отказы происходят из-за повреждения межвитковой изоляции обмотки как самого слабого элемента.

Степень разработанности темы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования надежности низковольтных обмоток изложены в ряде работ, проведенных коллективами под руководством Бернштейн Л.М., Галушко А.И., Гольдберга О.Д., Похолкова Ю.П. и др. В этих работах описаны критерии и механизм отказа низковольтных обмоток; исследованы процессы дефектообразования в витковой изоляции при изготовлении и во время эксплуатации; предложены способы испытаний и методы определения дефектности электроизоляционных материалов и обмоточных проводов; разработаны математические модели, методы оценки и прогнозирования показателей надежности систем изоляции обмоток. Установлено: критерием отказа является наличие сквозных повреждений в изоляции – дефектов, в местах которых возможно возникновение короткого замыкания.

В то же время, остается нерешенным ряд вопросов, связанных со снижением дефектности межвитковой изоляции низковольтных обмоток:

- существующие методы испытаний не всегда адекватно оценивают устойчивость эмалевой изоляции к дефектообразованию, а также не учитывают особенности её эксплуатации в составе частотно-регулируемых приводов с широтно-импульсной модуляцией питающего напряжения;
- отсутствуют количественные критерии оценки устойчивости эмалевой изоляции обмоточных проводов к образованию дефектов;

- отсутствуют методы количественной оценки величины адгезионного взаимодействия между компонентами системы межвитковой изоляции и его влияния на процессы дефектообразования;
- отсутствуют рекомендации по экспресс-прогнозированию уровня дефектности межвитковой изоляции в процессе эксплуатации.

Решение вышеперечисленных проблем, является актуальной задачей, так как позволит снизить уровень дефектности межвитковой изоляции и тем самым повысить её надежность.

Идея работы: снижение дефектности и повышение надежности низковольтной межвитковой изоляции исключением применения компонентов с недостаточной устойчивостью к дефектообразованию.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка комплекса мероприятий по снижению дефектности межвитковой изоляции низковольтных обмоток.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. оценить адекватность существующих методов оценки устойчивости эмалевой изоляции обмоточных проводов к дефектообразованию, в том числе с учетом особенностей эксплуатационных нагрузок, характерных для частотно-регулируемых приводов с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения;
2. исследовать влияние уровня дефектности межвитковой изоляции на показатели её надежности;
3. исследовать влияние адгезионного взаимодействия на процессы дефектообразования в системах межвитковой изоляции;
4. разработать рекомендации по экспресс-прогнозированию интенсивности дефектообразования в межвитковой изоляции в процессе эксплуатации;
5. разработать мероприятия по снижению дефектности межвитковой изоляции.

Научная новизна работы:

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод определения работы адгезии для системы «пропиточный состав - эмалированный провод».
2. Установлена корреляционная связь между работой адгезии и скоростью дефектообразования в межвитковой изоляции низковольтных обмоток.
3. Установлено, что отказ межвитковой изоляции обмоток низковольтных электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения, возможен при единичных дефектах эмалевой изоляции.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании возможности прогноза скорости дефектообразования на основе количественной оценки работы адгезии в системах межвитковой изоляции.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны критерии по определению устойчивости эмалевой изоляции к дефектообразованию.
2. Разработаны рекомендации по экспресс-прогнозированию скорости дефектообразования с учетом адгезионного взаимодействия в межвитковой изоляции.
3. Получены новые данные по скоростям дефектообразования для ряда систем межвитковой изоляции.
4. Разработан метод определения устойчивости эмалевой изоляции к действию поверхностных разрядов (Патент на изобретение №2491565 от 27.08.13).

Методология диссертационного исследования. Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили результаты отечественных и зарубежных исследований в области надежности систем изоляции электрических машин, адгезии, прочности и разрушения полимерных композиционных материалов. При выполнении работы были применены методы математической статистики и обработки результатов эксперимента.

Методы диссертационного исследования. В ходе исследований применялись стандартные и оригинальные методы испытаний на реальных образцах обмоточных проводов и физических моделях систем межвитковой изоляции; для статистической обработки экспериментальных данных и расчетов использовались программные продукты: MS Excel, Mathcad 14.0 и COMSOL Multiphysics 3.5a.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Необходимый уровень вероятности безотказной работы межвитковой изоляции обеспечивается при дефектности эмалевой изоляции проводов не более $0,006 \text{ мм}^{-1}$.
2. Единичные дефекты резко снижают среднее время до пробоя межвитковой изоляции низковольтных электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения.
3. Интенсивность процессов дефектообразования в межвитковой изоляции во время эксплуатации может быть спрогнозирована с учетом работы адгезии.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность полученных результатов определяется использованием научно-обоснованных методов исследований и статистической обработки результатов экспериментов, а также сопоставлением экспериментальных и расчетных данных с ранее проводимыми исследованиями.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: XII Всероссийском студенческом научно-техническом семинаре «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск: ТПУ, 2010 г.); XI Региональной научно-практической студенческой конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (г. Томск: ТПУ, 2011 г.); XVII, XIX Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск: ТПУ, 2011 г., 2013 г.); V, VII Международных научно-технических конференциях «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск: ТПУ, 2011г., 2015г.); II, III Российских молодежных научных школах-конференциях «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» - г. Томск: ТПУ, 2014 г.- 2015г.; VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск: НГТУ, 2015г.); 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) (г. Флоренция, Италия, 2016г.).

Внедрение результатов исследований. Результаты экспериментальных исследований дефектности и дефектообразования для различных систем «эмалированный провод – пропиточный состав» переданы и используются на АО «Сибкабель», ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева», г. Томск.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в планировании и проведении экспериментальных исследований; обработке, анализе и обобщении полученных данных; написании статей, докладов; разработке и оформлении патента на изобретение.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для соискателей ученых степеней, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 120 страницах, содержит 49 рисунков, 32 таблицы, 3 приложения и список использованных источников из 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, ее научная новизна и практическая значимость, представлены цель и задачи диссертационной работы. Приведен краткий обзор содержания работы.

В первой главе рассмотрены причины образования дефектов и их влияния на надежность межвитковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных двигателей. Износ изоляции и интенсивность дефектообразования зависит

от уровня воздействующих нагрузок (технологических и эксплуатационных), конструктивных параметров обмотки и совместимости компонентов системы изоляции. Повреждаемость изоляции характеризуется дефектностью λ – количеством дефектов на единицу длины или площади изоляции ($1/\text{мм}$; $1/\text{мм}^2$).

При этом различают зависимые и независимые (единичные) дефекты (рисунок 1). Для низковольтной межвитковой изоляции опасными считаются зависимые (сквозные) дефекты. Независимые дефекты – повреждения изоляции только одного из соприкасающихся витков считаются менее опасными, так как их наличие не приводит к преждевременному отказу. Это связано с тем, что пробивное напряжение даже состаренной изоляции превышает величины рабочих напряжений и перенапряжений.

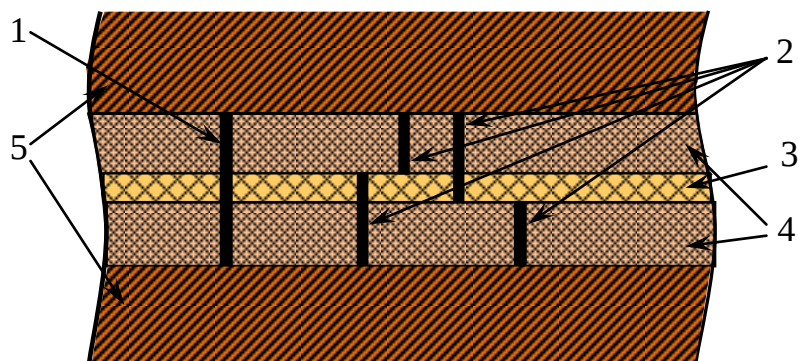


Рисунок 1 – Возможные дефекты в системе межвитковой изоляции: 1) дефект зависимый; 2) дефекты независимые; 3) пропиточный состав; 4) изоляция провода; 5) токопроводящая жила провода.

Показано: повышение надежности межвитковой изоляции возможно путем исключения применения обмоточных проводов с высокой дефектностью (дефектность в состоянии поставки λ_{II}) и низкой устойчивостью к дефектообразованию в процессе производства обмоток (технологическая дефектность λ_T), а также обеспечением минимального дефектообразования в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» в процессе эксплуатации электродвигателей (эксплуатационная дефектность $\lambda_Э$).

Рассмотрена проблема и причины ускоренного износа межвитковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемых приводов с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. Отмечена необходимость учета действия электрических разрядов на процессы образования дефектов в межвитковой изоляции.

Проведенный обзор существующих методов определения и прогнозирования дефектности компонентов и систем межвитковой изоляции показал их недостаточную информативность; нечеткость используемых критериев; сложность, длительность и трудоемкость проведения экспериментов. Так же не учитывается величина адгезионного взаимодействия между компонентами систе-

мы, определяющая характер и интенсивность процессов дефектообразования. Результаты проведенного анализа позволяют говорить о необходимости разработки комплекса мероприятий позволяющего снизить дефектность межвитковой изоляции, как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации асинхронных электродвигателей.

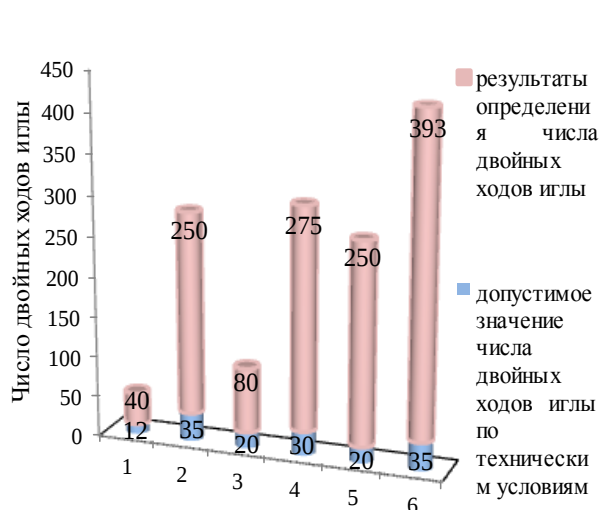
Во второй главе приведено описание исследуемых обмоточных проводов и пропиточных составов, а также используемых в работе методов оценки устойчивости межвитковой изоляции к дефектообразованию: определение механической прочности эмалевой изоляции согласно ГОСТ 14340.10–69, ГОСТ Р МЭК 60851-3–2002, электрической – ГОСТ Р МЭК 60851-5–2008. Дефектность эмалированных проводов определялась в электролите; скорость дефектообразования систем межвитковой изоляции оценивалась по результатам испытаний на макетах (за основу принята методика, изложенная в ОСТ16 0.800.821-88).

Третья глава посвящена исследованию дефектности систем межвитковой изоляции низковольтных обмоток. Проведена оценка устойчивости эмалевой изоляции проводов к образованию дефектов. В ходе исследований установлено, что используя лишь стандартные методы не всегда можно адекватно оценить качество и устойчивость эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам. Для методов определения механической прочности характерна малая статистическая устойчивость данных (таблица 1), используемые критерии условны и малоинформативны (рисунок 2). При этом испытываются провода только в состоянии поставки, что совершенно не позволяет учесть изменение дефектности из-за механических нагрузок, возникающих при изготовлении реальных обмоток.

Таблица 1 – Влияние растяжения провода на стойкость изоляции к истиранию под постоянной нагрузкой

Марка провода	Параметр	Число двойных ходов иглы N по поверхности изоляции			
		Относительное удлинение образца, %			
		0	3	5	7
ПЭЭА-155	Интервал изменения	15÷62	19÷55	14÷53	19÷59
	Среднее значение	40	28	30	33
ПЭТД-180	Интервал изменения	130÷270	102÷284	25÷164	27÷372
	Среднее значение	250	203	64	159
ПЭТ-155	Интервал изменения	24÷226	22÷197	6÷61	23÷128
	Среднее значение	80	74	39	56

Контроль величины пробивного напряжения $U_{пр}$ дает возможность выявить провода с низкой электрической прочностью (рисунок 3). Однако результаты лишь констатируют факт наличия или отсутствия повреждения изоляции без анализа процессов, приводящих к разрушению.



Марка провода: 1 – ПЭЭА-155; 2 – ПЭТД-180; 3 – ПЭТ-155; 4 – ПЭТ-200-1;
5 – ПЭТВ-2; 6 – ПЭТД2-К-180.

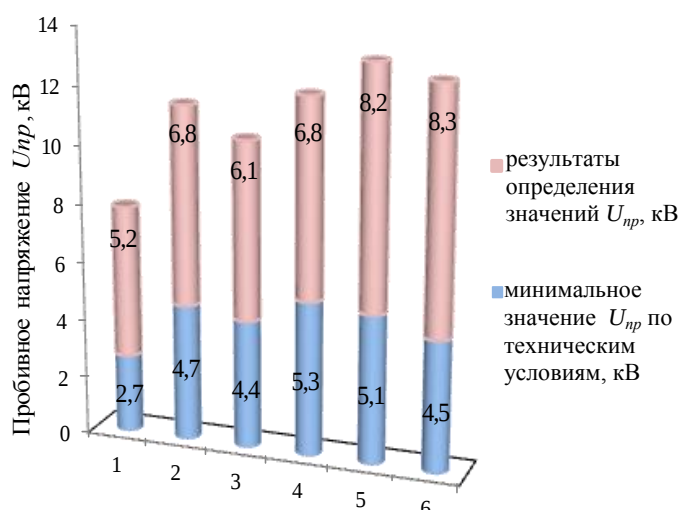


Рисунок 3 – Средние значения пробивных напряжений эмалированной изоляции проводов.

Рисунок 2 – Стойкость к истиранию эмалированной изоляции проводов под постоянной нагрузкой.

Показано: точная количественная оценка стойкости к воздействующим нагрузкам обеспечивается при определении дефектности в электролите. Кроме того в ряде случаев отмечено значительное приращение дефектности изоляции (например провода ПЭЭА-155), но стандартные методы не всегда позволяют выявить недопустимое ухудшение свойств изоляции (таблица 2). В результате можно сделать неверный вывод о механической прочности изоляции провода.

Таблица 2 – Дефектность изоляции эмалированных проводов после механических воздействий и выдержки в растворителе

Марка провода	Дефектность изоляции λ (мм ⁻¹), после механических воздействий и выдержки в растворителе для образцов с различным относительным удлинением, %			
	0	3	5	7
ПЭЭА-155	0,036	0,0416	0,0524	0,076
ПЭТ-155	0	0,00012	0,00028	0,00036
ПЭТД-180	0,0016	0,002	0,003	0,0028
ПЭТД2-К-180	0	0	0	0,0002

Таким образом, дефектность – наиболее информативная и адекватная характеристика, отражающая свойства эмалированной изоляции, использование которой со стандартными методами повысит точность оценки свойств изоляции.

Помимо высокой механической прочности в последние годы потребители обмоточных проводов предъявляют новое требование: устойчивость эмалированной изоляции к воздействию коронных разрядов. Это проблема характерна для обмоток электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения.

Преобразователи частоты, построенные на базе полупроводниковых ключей с высокой скоростью переключения, обуславливают повышенные электрические нагрузки во время эксплуатации.

Электрические перенапряжения в низковольтных обмотках приводят к возникновению электрических разрядов по поверхности изоляции, в значительной степени ускоряющих процессы ее старения и дефектообразования.

Такие испытания могут быть осуществлены при помещении образца провода в среду действия электрических разрядов. Предлагаемый подход реализован в системе электродов «провод – дробь» (рисунок 4). При подаче высокого напряжения на дробь образуются электрические разряды по всей поверхности эмалированного провода. В результате их действия постепенно разрушается эмалевая изоляция и происходит её пробой.

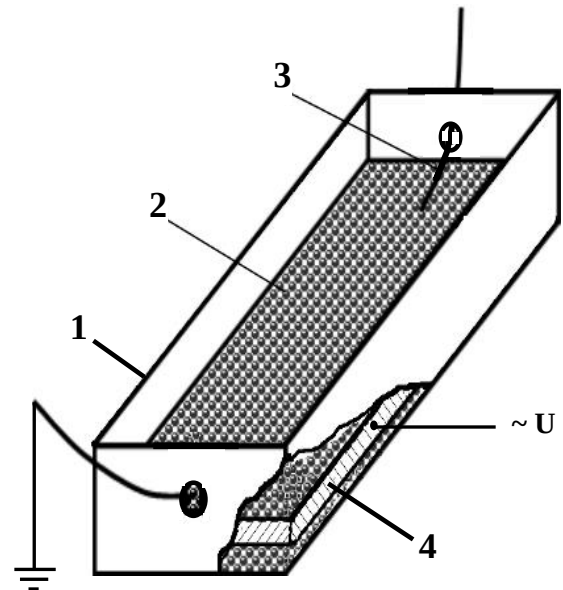


Рисунок 4 – Устройство для испытаний изоляции эмалированных проводов: 1) ванна; 2) стальная дробь; 3) образец провода; 4) металлический электрод.

Наибольшая стойкость к действию электрических разрядов отмечена у провода ПЭТД2-К-180 (таблица 3). В настоящее время это единственная выпускаемая марка провода в России с изоляцией, устойчивой к электрическим разрядам и рекомендуемая для обмоток двигателей частотно регулируемых электроприводов. В связи с этим в качестве критерия предлагается принять среднее время до пробоя изоляции данного провода; величина испытательного напряжения $U_{исп}$ может быть принята в пределах 4÷5,5 кВ.

Таблица 3 – Среднее время до пробоя $t_{пр}$ (секунд) изоляции проводов в системе электродов «провод – дробь»

Марка провода	Испытательное напряжение $U_{исп}$, кВ				
	3,5	4	4,5	5	5,5
ПЭЭА-155	330	120	50	-	-
ПЭТВ-2	-	920	660	300	100
ПЭТ-155	-	2600	820	330	60
ПЭТД-180	-	4000	1750	1140	100
ПЭТД2-К-180	-	5300	2100	1900	450
ПЭТ-200-1	-	1700	900	270	75

В то же время, не смотря на тщательный отбор проводов, устойчивых к воздействию нагрузкам, не исключается образование дефектов в процессе обмоточно-изолировочных работ. Считается, что подобного рода технологиче-

ские дефекты должны «залечиваться» при качественной пропитке с восстановлением электрической прочности поврежденного участка изоляции.

Так как при эксплуатации двигателя в составе частотно-регулируемого привода резко увеличивается уровень электрических перенапряжений, важно оценить эффективность восстановления изоляционного слоя в местах таких дефектов при пропитке.

Оценка скрытия пропиткой сквозных повреждений проводилась на макетных образцах (скрутки из провода ПЭТД2-К-180, выполненные согласно ГОСТ Р МЭК60851-5–2008) путем определения среднего времени до пробоя (рисунок 5).

Испытуемые образцы помещались в термошкаф, нагретые до температуры, соответствующей классу нагревостойкости провода (180°C). После этого образец испытывался высокочастотным модулированным напряжением, при этом по всей рабочей поверхности скрутки возникал непрерывный коронный разряд, который в сочетании с температурой адекватно воспроизводит основные эксплуатационные воздействия на межвитковую изоляцию.

Испытывались бездефектные скрутки и с искусственно нанесенным (единичным) дефектом на одном витке; непропитанные и в сочетании с пропиточными составами: КО-916К, КП-50 и КП-55-5.

Выявлено, что наличие сквозных дефектов в эмалевой изоляции, даже на одном витке, ведет к резкому снижению среднего времени до пробоя (рисунок 6). Коронные разряды, возникающие под действием перенапряжений в местах независимых дефектов, приводят к ускоренному разрушению неповрежденной эмалевой изоляции на втором витке (рисунок 7). То, что пробой изоляции практически на всех образцах происходит в месте дефекта, подтверждает данное предположение (рисунок 8).

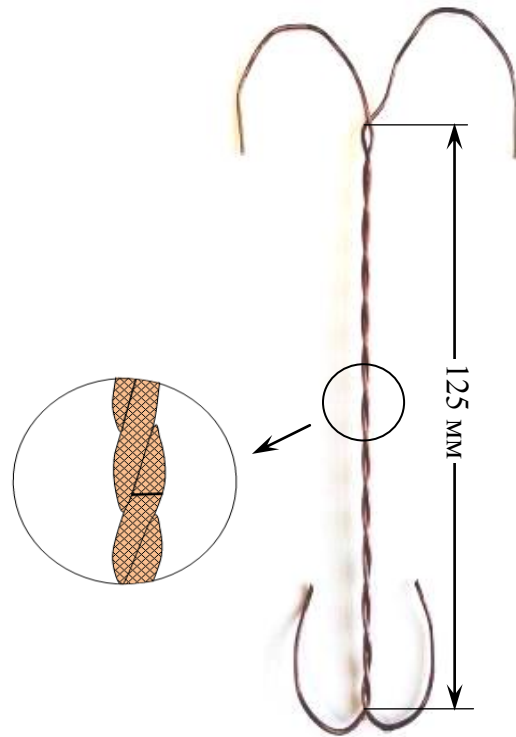


Рисунок 5 – Общий вид скруток обмоточного провода с кольцевым дефектом на одном витке.

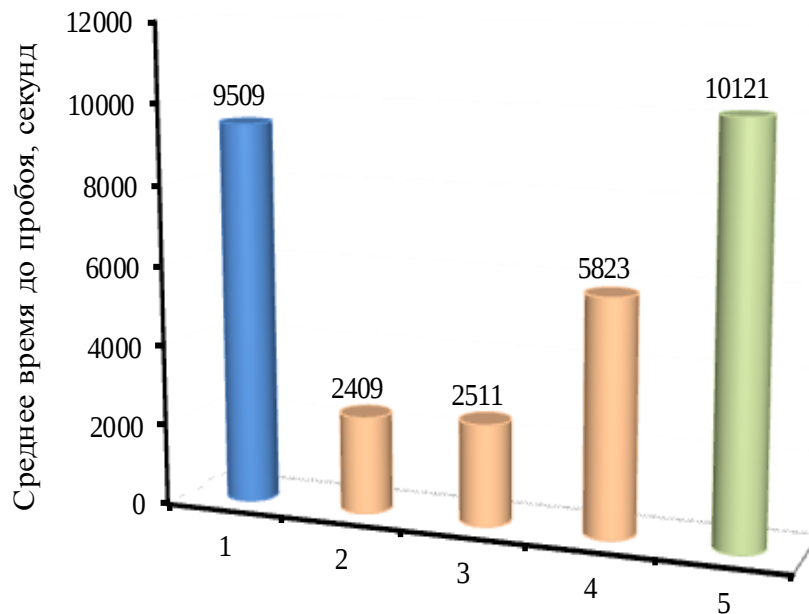


Рисунок 6 – Среднее время до пробоя скруток из провода ПЭТД2-K-180 при испытаниях ВЧ-модулированным сигналом: 1 – бездефектные непропитанные образцы; 2 – непропитанные образцы с кольцевым дефектом на одном витке; образцы с кольцевым дефектом на одном витке пропитанные: 3 – лаком КО-916К, 4 – компаундом КП-55-5, 5 – компаундом КП-50.

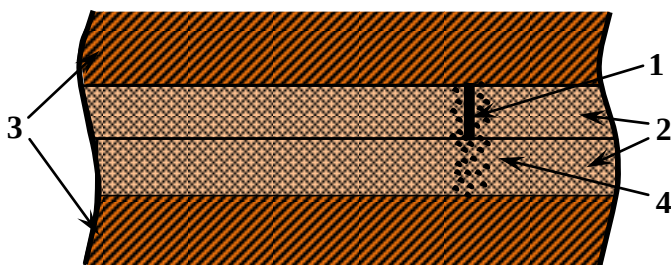


Рисунок 7 – Физическая модель отказа элемента низковольтной межвитковой изоляции в обмотке ЧРП: 1) независимый дефект; 2) изоляция провода; 3) токопроводящая жила провода; 4) появление коронных разрядов в месте дефекта.



Рисунок 8 – Характерный вид места пробоя изоляции макетного образца в месте дефекта.

Заметное повышение среднего времени до пробоя отмечено при пропитке компаундами. Пленка отвержденного компаунда обладает меньшей усадкой, большей толщиной, стойкостью к электрическим нагрузкам, что обеспечивает хорошеекрытие повреждений, повышая среднее время до пробоя (лучшее «залечивание» повреждений эмалевой изоляции отмечено при пропитке компаундом КП-50).

Таким образом, единичные дефекты резко снижают среднее время до пробоя межвитковой изоляции низковольтных электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения.

В процессе эксплуатации дефектообразование в межвитковой изоляции начинается с появления трещин в пропиточном составе, которые впоследствии могут привести к разрыву эмалевой пленки. При этом вероятность образования сквозных дефектов определяется величиной адгезионного взаимодействия между компонентами системы.

С учетом того, что в случае межвитковой изоляции образуется контакт между двумя полимерными пленками (эмалевой изоляции и пропиточного состава) предлагается оценить работу адгезии W_a путем определения поверхностных энергий контактирующих материалов: пропиточного состава γ_{nc} , эмалевой изоляции $\gamma_{эи}$ и их межфазной энергии $\gamma_{nc-эи}$ согласно:

$$W_a = \gamma_{nc} + \gamma_{эи} + \gamma_{nc-эи} \quad (1)$$

Учитывая, что электроизоляционные эмали и пропиточные составы представляют собой полярные диэлектрики, поверхностная энергия γ будет определяться дисперсионной и полярной составляющими (обусловлены образованием водородных связей и дипольным взаимодействием):

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad (2)$$

Определение дисперсионной и полярной составляющих эмалевой изоляции и отвержденного пропиточного состава осуществлялось путем измерения углов смачивания θ двумя жидкостями, для которых значения дисперсионной и полярной составляющих известны (в работе использованы вода и глицерин), с последующим решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \gamma_{H_2O}(1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_{эи(nc)}^d \gamma_{H_2O}^d} + \sqrt{\gamma_{эи(nc)}^p \gamma_{H_2O}^p} \right) \\ \gamma_{глиц}(1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_{эи(nc)}^d \gamma_{глиц}^d} + \sqrt{\gamma_{эи(nc)}^p \gamma_{глиц}^p} \right) \end{cases} \quad (3)$$

Краевой угол смачивания определялся путем последовательного гидростатического взвешивания.

Сопоставление данных работы адгезии W_a , определенных по выражению 1, с литературными и экспериментально полученными величинами скоростей дефектообразования H_e для ряда систем «пропиточный состав – эмалированный провод» (таблица 4), показало: для систем с большей величиной работы адгезии характерна более высокая скорость дефектообразования. Это связано с повышением вероятности развития сквозного дефекта в системе «пропиточный состав - эмалированный провод», что приводит к снижению надежности полученной композиции.

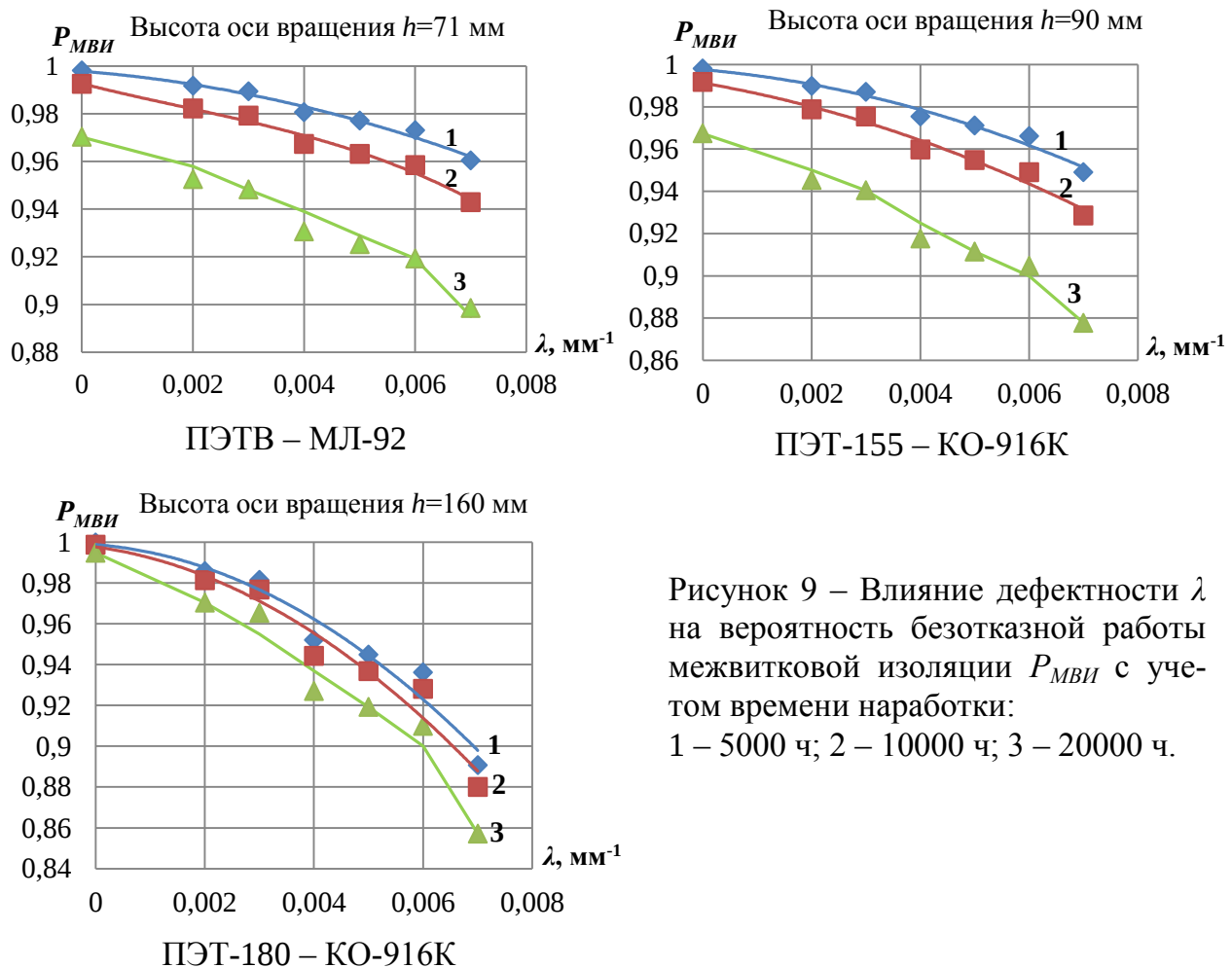
Таблица 4 – Соотношение величин работы адгезии W_a и скоростей дефектообразования H_g в системах межвитковой изоляции

Система "пропиточный состав – эмалированный провод"	Работа адгезии W_a , 10^{-3} Н/мм	Скорость дефектообразования H_g , 10^{-6} мм $^{-1}$ ч $^{-1}$
ГФ-95 + ПЭТВ*	0,160	0,18
МЛ-92 + ПЭТВ*	0,137	0,141
КО-916К + ПЭТ-155*	0,116	0,137
КО-916К + ПЭТД-180	0,108	0,011
ПЭ-9153М + ПЭТД-180	0,094	0,0095
ПЭ-9153М + ПЭЭА-155	0,082	0,004
КО-916К + ПЭФД-2-200	0,058	0,0025

*литературные данные скоростей дефектообразования.

Четвертая глава посвящена разработке рекомендаций по снижению уровня дефектности межвитковой изоляции низковольтных обмоток.

В связи с отсутствием в технической литературе четкого обоснования предельного значения допустимой дефектности изоляции эмалированных проводов проведен расчет вероятности безотказной работы для ряда современных систем межвитковой изоляции, для нескольких габаритов асинхронных двигателей серии АИР (рисунок 9).



Результаты расчетов показали, что для всех рассмотренных вариантов при дефектности $\lambda > 0,006 \text{ мм}^{-1}$ вероятность безотказной работы снижается ниже допустимого уровня: $P_{МВИ} < 0,9$ при времени наработки 20000 ч. Установление данного критерия позволяет обоснованно исключить применение проводов с низкой устойчивостью к образованию дефектов, что позволит повысить надежность межвитковой изоляции и всей обмотки в целом.

Учитывая, что эксплуатационная дефектность межвитковой изоляции определяется величиной адгезионного взаимодействия между её компонентами, предлагается оценивать интенсивность процессов дефектообразования в межвитковой изоляции с учетом величины работы адгезии.

Определенный в работе коэффициент корреляции между скоростью дефектообразования и работой адгезии составляет $r \approx 88\%$, что свидетельствует о наличии высокой статистической связи между этими величинами (рисунок 10).

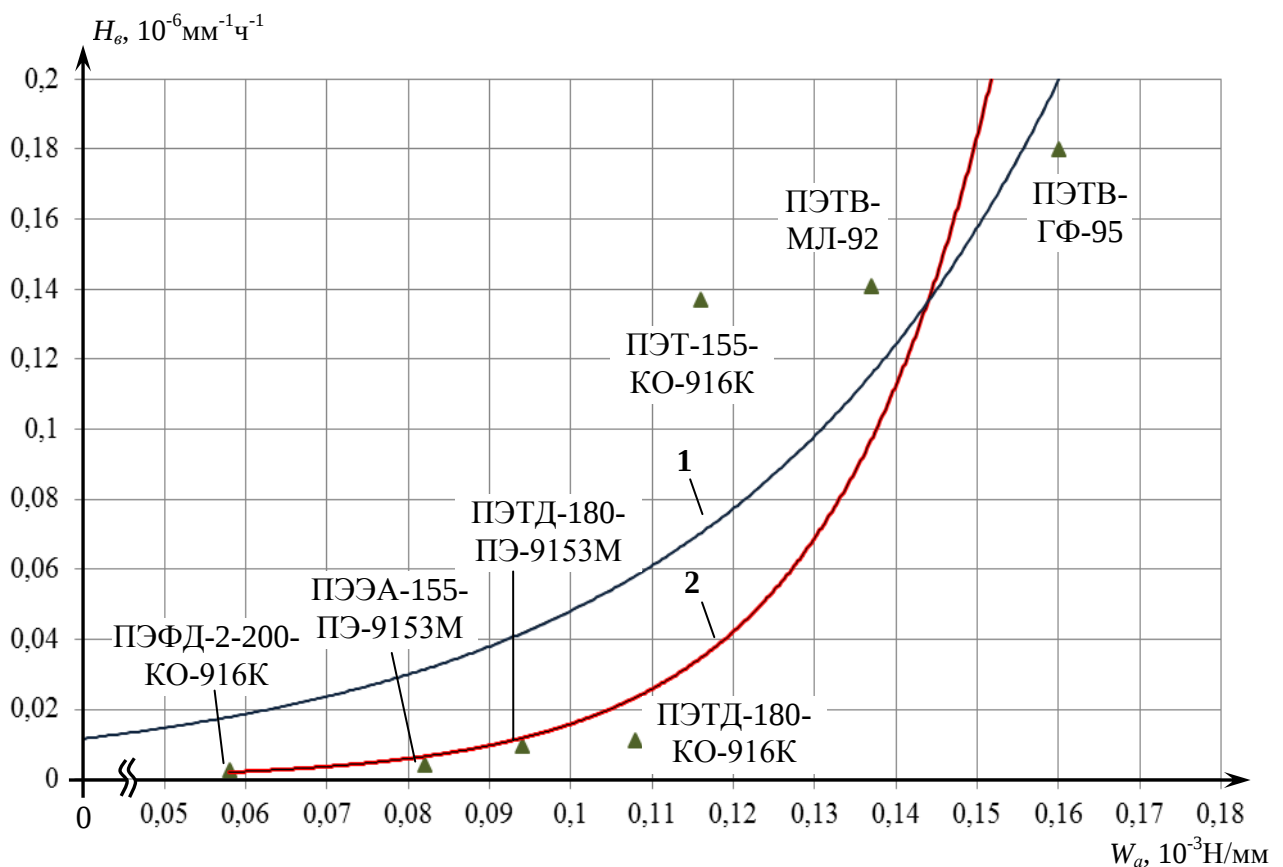


Рисунок 10 – Зависимость скорости дефектообразования H_δ от работы адгезии W_a в системах межвитковой изоляции: 1 – расчетная кривая (определена по выражению 4); 2 – экспериментальная кривая.

Определено уравнение регрессии, приближающее наилучшим образом в среднем функцию $H_s = f(W_a)$

$$y = -0,0964 + 0,9519x + 4,9845x^2 \quad (4)$$

Для всех рассмотренных систем характерно повышение скорости дефектообразования с увеличением работы адгезии между пропиточным составом и эмалевой изоляцией обмоточного провода. Наибольшая скорость дефектообразования отмечена в системах МЛ-92+ПЭТВ, ГФ-95+ПЭТВ.

Для пропиточных лаков МЛ-92 и ГФ-95 характерна большая потеря массы в процессе старения (до 50%), что обуславливает рост величины внутренних механических напряжений и, в сочетании с высокой работой адгезии, ускоряет процессы дефектообразования.

Пленка кремнийорганического лака КО-916К обладает большей эластичностью за счет сравнительно меньшей усадки и потери массы (10÷15 %) и, как следствие, меньшими внутренними механическими напряжениями. В этом случае определяющую роль играет величина адгезии: чем она выше, тем выше скорость дефектообразования (система КО-916К+ПЭТ-155). И наоборот, минимальная интенсивность процессов разрушения отмечена в системах с наименьшей величиной работы адгезии.

Разброс значений работы адгезии W_a , очевидно, связан с принятым в работе допущениями: не учитывалось распределение пропиточного состава в реальной обмотке, внутренние механические напряжения, а также изменение работы адгезии в процессе старения.

Таким образом, снижение дефектности путем выбора оптимальных сочетаний компонентов межвитковой изоляции возможно с учетом работы адгезии, так как она определяет вероятность образования сквозного дефекта.

Результаты работы сведены в комплекс мероприятий (рисунок 11), позволяющий снизить уровень дефектности межвитковой изоляции во время изготовления и в процессе эксплуатации.

В заключении приведены основные выводы по результатам диссертационной работы.

В приложениях представлены таблицы с результатами исследований, акты внедрения результатов работы и патент на изобретение.



Рисунок 11 – Блок-схема проведения мероприятий по обеспечению минимального уровня дефектности λ межвитковой изоляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным итогом проведенной работы является разработка рекомендаций по снижению дефектности низковольтной межвитковой изоляции, в основу которых положено определение критериев допустимой дефектности эмалированных проводов и установление корреляционной зависимости работы адгезии и скорости дефектообразования.

Научные и практические результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть сформулированы следующим образом.

1. Уровень вероятности безотказной работы межвитковой изоляции $P_{МВИ} \geq 0,9$ при наработке 20000 часов обеспечивается при дефектности эмалевой изоляции не более $0,006 \text{ мм}^{-1}$.

2. Устойчивость эмалевой изоляции к действию поверхностных разрядов, необходимой для обмоток электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией напряжения, может быть оценена в системе «провод-дробь» (Патент на изобретение №2491565 от 27.08.13). Проведенные исследования показали, что наибольшее среднее время до пробоя отмечено у провода ПЭТД2-К-180.
3. Выявлено критическое влияние несовпадающих дефектов на среднее время до пробоя и отказ низковольтной межвитковой изоляции при действии электрических нагрузок, обусловленных широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. В этом случае рекомендуется применять только короностойкие бездефектные провода, пропитку предпочтительно осуществлять пропиточными составами без растворителей.
4. В работе впервые предложен метод расчетно-экспериментальной оценки работы адгезии в системе межвитковой изоляции, основанный на определении поверхностных энергий пленок эмалевой изоляции и пропиточного состава, а также их межфазной энергии.
5. Установлена и математически описана статистическая связь между величиной работы адгезии и скоростью дефектообразования межвитковой изоляции в процессе эксплуатации.
6. Сформулированы рекомендации, позволяющие проводить экспресс-прогнозирование интенсивности процессов дефектообразования в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» в зависимости от величины работы адгезии.
7. Результаты работы внедрены на предприятиях г. Томска.

Перспективы дальнейшей разработки темы: полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований возможности получения рекомендаций по снижению дефектности систем изоляции обмоток низковольтных электрических машин постоянного тока.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Леонов, А.П. Определение работы адгезии в системе межвитковой изоляции [Электронный ресурс] / А.П. Леонов, А.С. Супуева // Интернет – журнал «Науковедение». – 2013. – № 3. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/24tvn313.pdf> (дата обращения 29.02.2016 г.).
2. Дудкин, А.Н. Обеспечение качества пропитки обмоток мехатронных систем / А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева // В мире научных открытий. – 2015. – №8 (68). – с. 52-65.

3. Дудкин, А.Н. Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием / А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева // Томск: Известия ТПУ. – 2015. – том 326. № 11. – с. 83-89.

Патенты:

4. Пат. 2491565 Российская федерация, МПК G01R31/12. Способ определения стойкости изоляции эмалированных проводов к поверхностным разрядам / Леонов А.П., Коробцов А.А., Супуева А.С.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU). – № 2012109972/28; заявлен 14.03.2012; опубл. 27.08.2013 Бюл. № 24.

Научные публикации в других изданиях:

5. Супуева, А.С. Оценка величины адгезионного взаимодействия в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» / А.С. Супуева, А.П. Леонов // Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», ТПУ, Томск, 2013. – с.351-352.
6. Дудкин, А.Н. К вопросу скрытия пропиткой дефектов в межвитковой изоляции обмоток ЧРП / А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», ТПУ, Томск, 2015. – с. 271-273.
7. Выгузов, Д.О. Исследование залечивания пропиткой сквозных дефектов в межвитковой изоляции / О.Д. Выгузов, А.В. Кодочигов, А.С. Супуева // Материалы III Российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи», ТПУ, Томск, 2015. – с. 92-94.
8. Leonov, A. The comparison of methods of testing enameled wire to mechanical stress / A. Leonov, A. Supueva // Trans Tech Publication, Switzerland: Applied Mechanics and Materials, ISSN: 1662-7482, 2015. – Vol. 792. – pp. 33-37.
9. Супуева, А.С. Методы определения механической прочности изоляции эмалированных проводов / А.С. Супуева, А.П. Леонов // Сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика», НГТУ, Новосибирск, 2015. – с. 268-272.
10. Leonov, A. Influence of Defects in Windings Insulation on its Operation Reliability / A. Leonov, A. Supueva, V. Bolgova // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Florence, Italy, ISBN 978-1-5090-2319-6, 2016. – pp. 742-745.