

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 681.2.08

ИСАЕВ
Александр Витальевич

**СПЕКТРАЛЬНО-ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН СО ВСЫПНОЙ ОБМОТКОЙ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения

Минск, 2024

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

СУХОДОЛОВ Юрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Электрические системы» Бело-
русского национального технического уни-
верситета

Официальные оппоненты:

ГУСЕВ Александр Петрович,
доктор технических наук, главный науч-
ный сотрудник лаборатории металлофизи-
ки ГНУ «Институт прикладной физики
НАН Беларуси»;

МЕНЖИНСКИЙ Андрей Борисович,
кандидат технических наук, доцент, замест-
итель начальника кафедры «Электротех-
ники и систем электропитания» Военной
Академии Республики Беларусь

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Белорусский
государственный университет транспорта»

Защита диссертации состоится 21 июня 2024 г. в 16.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (017) 2939618, e-mail: D.02.05.17@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» мая 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор технических наук, профессор



Н. Н. Ризноокая

© Исаев А. В., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Согласно статистическим исследованиям, проведенным как в Республике Беларусь, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья, одной из основных проблем современного приборо- и станкостроения является своевременная и качественная диагностика электрических машин (ЭМ) различного класса, от которых в той или иной степени зависит работоспособность, а, следовательно, и эффективность применяемого оборудования. При этом развитие электроники в организации управления технологическими процессами только усугубляет проблему. Учитывая, что на ослабление и нарушение изоляции токоведущих частей такого оборудования приходится до 95 % всех дефектов, то основное внимание необходимо делать именно на оценке свойств изоляции.

Однако разработанные как в странах ЕАЭС, так и дальнего зарубежья современные методы позволяют только в общем виде оценить состояние изоляции токоведущих частей, в том числе и в обмотках электрических машин, а, следовательно, не дают возможность зафиксировать начало дефектообразования, и в большей степени только констатируют факт окончательного выхода оборудования из строя. Одним из способов решения данной проблемы является постоянное, в том числе и в процессе эксплуатации, измерение сопротивления межвитковой изоляции обмоток контролируемых электрических машин. Поэтому в настоящее время стоит актуальная задача в разработке методов и построение на их основе приборов, позволяющих проводить диагностику состояния обмоток электрических машин, которая основана на измерении сопротивления изоляции токоведущих частей без использования сложных методик, в том числе непосредственно в процессе эксплуатации, а также оценки работоспособности и исправности диагностируемых электрических машин на основе полученных измерений.

В рамках диссертационной работы проведен анализ существующих методов и средств для измерения сопротивления изоляции электрического оборудования в том числе при диагностики состояния обмоток трехфазных синхронных и асинхронных двигателей, представлены методы, позволяющие измерить сопротивление межвитковой изоляции эксплуатируемого оборудования, определены правила формирования измерительного сигнала, позволившие увеличить чувствительность и уменьшить погрешность разработанных методов и описаны приборы, позволяющие на основе заявленных методов производить измерение сопротивления межвитковой изоляции в дефектных обмотках диагностируемых электрических машин.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы утвержденным Указом Президента Республики Беларусь 07.05.2020 № 156: «4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы», в том числе «машиностроение и машиноведение».

Исследования, составившие основу диссертационной работы, выполнялись в рамках выполнении НИР (г/б № 21-36/7 «Разработка принципов зондовой электрометрической диагностики дефектов прецизионных поверхностей материалов»).

Диссертационная работа также соответствует научному направлению кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета и выполнялась в рамках научно-исследовательского проекта «Разработка научных основ проектирования элементов и систем информационно-измерительной техники» ГБ 21-238 от 19.02.2022.

Цель и задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов измерения ослабленного или дефектного межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин и построение на их основе измерительных систем, обеспечивающих определение образование дефектов в них.

Для достижения поставленной цели в процессе исследований потребовалось решить следующие задачи:

- оценить наиболее эффективные методы контроля состояния обмоток электрических машин с целью определения возможности их применения для измерения сопротивления межвитковой изоляции в дефектных обмотках;
- исследовать закономерности влияния величины сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин на изменение фаз спектральных составляющих тока холостого хода при нахождении их в режиме эксплуатации;
- исследовать закономерности влияния величины сопротивления межвитковой изоляции на их частотные характеристики;
- разработать метод формирования измерительного сигнала, позволяющего уменьшить влияние нестабильности его параметров на результаты измерения сопротивления межвитковой изоляции;
- провести анализ составляющих погрешности при измерении сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин;
- провести экспериментальные исследования разработанных методов и средств измерения сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин.

Объектом исследований являются методы и средства измерения сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин. Предметом исследований являются методологические основы измерения сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин на основе анализа начальных фаз спектральных составляющих и анализе частотных свойств их обмоток; структурная, схемотехническая и конструкционная реализация системы измерения сопротивления межвитковой изоляции для контроля состояния обмоток электрических машин.

Научная новизна

Полученные в рамках диссертационных исследований результаты обладают новизной:

– установлен эффект зависимости временного интервала между точками перехода через нуль кривой первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой высших спектральных составляющих от значения сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин, и разработан на его основе метод измерения ослабленного сопротивления дефектной межвитковой изоляции, что позволяет в режиме эксплуатации диагностируемых электрических машин измерять значение сопротивления межвитковой изоляции в диапазоне от 1 Ом до 300 Ом с погрешностью не более 5 % и тем самым идентифицировать их неработоспособное, предотказное и работоспособное состояние;

– установлен эффект зависимости разности фаз сигналов полученных с двух плеч измерительного моста, формируемого обмотками электрической машины, от значения сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин, и разработан на его основе метод измерения ослабленного сопротивления дефектной межвитковой изоляции, что позволяет измерять сопротивление межвитковой изоляции в диапазоне от 1 Ом до 100 кОм с погрешностью не более 30 % и тем самым идентифицировать неработоспособное, предотказное, работоспособное и исправное (более 1 кОм) состояние электрических машин в процессе проведения диагностических процедур на испытательном стенде;

– предложен метод измерения изменения временных параметров для контроля ослабленного сопротивления дефектной межвитковой изоляции в обмотках работающих электрических машин, не зависящий от нестабильности параметров исходного измерительного сигнала, основанный на формировании парных импульсных последовательностей. Метод позволяет путем измерения изменений временных параметров увеличить чувствительность и снизить погрешности, связанные с нестабильностью параметров испытательного сигнала, в несколько раз;

– предложен метод формирования измерительного сигнала для контроля ослабленного сопротивления дефектной межвитковой изоляции в обмотках электрических машин, основанный на повышении уровня в нем необходимой информативной спектральной составляющей на фоне соседних путем формирования блоков импульсных последовательностей с управляемыми временными параметрами. Метод позволяет увеличить селективность выделения характерных спектральных составляющих в формируемом измерительном сигнале, тем самым уменьшить погрешности, связанные с его нестабильностью до 0,01 %;

– разработаны принципы структурной, схемотехнической и конструктивной реализации функционально законченных систем измерения дефектных сопротивлений межвитковой изоляции в обмотках электрических машин, обеспечивающих построение различных специализированных устройств и установок для контроля их состояния.

Положения, выносимые на защиту

1. Установлен эффект зависимости временного интервала между точками перехода через нуль кривой первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой высших спектральных составляющих от значения сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин, что позволяет использовать его в качестве принципа измерения межвиткового сопротивления изоляции обмоток электрических машин в диапазоне от 1 Ом до 300 Ом в процессе их эксплуатации.

2. Метод измерений сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин, заключающийся в оценке параметров спектральных составляющих тока холостого хода, протекающего в фазных обмотках электрических машин в процессе их эксплуатации, и отличающийся измерением временного интервала между точками перехода через нуль кривой первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой высших спектральных составляющих, что позволяет измерять значение сопротивления межвитковой изоляции в диапазоне от 1 Ом до 300 Ом с погрешностью не более 5 % и тем самым идентифицировать неработоспособное (сопротивление менее 10 Ом), предотказное (от 10 до 100 Ом) и работоспособное (от 100 до 1000 Ом) состояния электрических машин в процессе их эксплуатации.

3. Установлен эффект зависимости разности фаз сигналов, полученных с двух плеч измерительного моста, формируемого обмотками электрической машины, от значения сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин, что позволяет использовать его в качестве принципа измерения сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин в диапазоне от 1 Ом до 100 кОм в процессе проведения диагностических процедур на испытательном стенде.

4. Метод измерений сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин, заключающийся в оценке параметров сигналов, полученных с двух плеч измерительного моста, формируемого обмотками электрической машины, и отличающийся измерением разности фаз сигналов, формируемых в резонансной области частот, характерной для обмоток диагностируемой электрической машины, что позволяет измерять сопротивление межвитковой изоляции в диапазоне от 1 Ом до 100 кОм с погрешностью не более 30 % и тем самым идентифицировать неработоспособное (сопротивление менее 10 Ом), предотказное (от 10 до 100 Ом), работоспособное (от 100 до 1000 Ом) и исправное (более 1 кОм) состояния электрических машин в процессе испытания на стенде.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные научные и практические результаты, представленные в диссертации, получены лично автором под руководством к.т.н., доцента Суходолова Ю. В. Научный руководитель принимал участие в постановке задач диссертационных исследований, планировании экспериментов, анализе полученных результатов и формулировке выводов. Соавторы публикаций по теме диссертации Шейников А. А. и Сизиков С. В. участвовали в анализе и обсуждении результатов исследований. Зеленко В. В. принимала участие в подготовке образцов

для исследования и проведения отдельных измерений. Результаты, полученные другими соавторами, не вошли в диссертационную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих международных научно-технических конференциях: «Приборостроение» (г. Минск, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), «Энергетика Беларуси» (г. Минск, 2019, 2020, 2021, 2023), «Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации», (г. Воронеж, 2020, 2021, 2022), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2023).

Результаты диссертационных исследований используются в лабораторно-диагностическом стенде для диагностики состояния обмоток электрических машин, разработанных ООО «БелгидросилаГрупп», а также применяются для контроля работоспособности электрических машин на ООО «Вэдэм-сервис» и ЧПУП «МеталлХот» что подтверждается 4 актами о практическом использовании результатов исследований в производстве.

Результаты диссертационных исследований используются в образовательном процессе на кафедре «Информационно-измерительная техника и технология» Белорусского национального технического университета, при изучении дисциплин «Программируемые цифровые устройства в информационно-измерительной технике» (акт № 214 от 11.05.2023 г.) и «Приемо-передающие устройства» (акт № 215 от 11.05.2023 г.).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, включая 6 статей, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (3,8 а. л.), 19 статей в сборниках материалов международных и республиканских научно-технических конференций (2,35 а. л.), поданы две заявки на патент и получено четыре акта внедрения в производство.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложения. Объем диссертации – 140 страниц, включая 44 рисунка, 18 таблиц и приложение. Список использованных источников из 101 наименований на 9 страницах, список собственных публикаций соискателя из 25 наименований на 3 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассматриваются основные проблемы своевременной и качественной диагностики состояния электрических машин, в том числе основанной на оценке и измерении сопротивления изоляции токоведущих частей. Так в главе рассмотрены способы измерения сопротивления изоляции, регламентированные нормативно-технической документацией, и применяемые при ремонте и эксплуатации электрических машин, систематизированы существующие методы

измерения, разработанные в стране и за рубежом, определены их основные достоинства и недостатки.

Согласно статистическим исследованиям, проведенным в ЕАЭС и за рубежом в трехфазных электрических машинах были выявлены следующие причины, приводившие к отказу оборудования (рисунок 1), где в совокупности на изменение состояния обмоток статора приходилось до 80 % от всех отказов (по некоторым источникам до 95 %). При этом на дефекты, связанные с ухудшением характеристик межвитковой изоляции, может приходиться до 70 %.

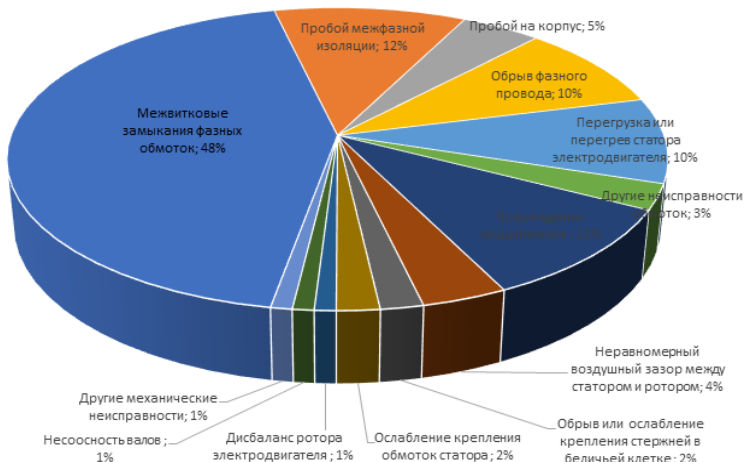


Рисунок 1 – Структура неисправностей трехфазных электрических машин

Поэтому одним из способов качественного контроля состояния электрических машин является контроль состояния изоляции их токоведущих частей, в том числе и путем измерения сопротивления самой изоляции. В настоящее время для проведения подобных измерений разработано достаточно большое количество методов, которые можно разделить на три группы:

- 1) измерение сопротивления изоляции между обмотками электрической машины и его корпусом;
- 2) измерение сопротивления изоляции между фазными обмотками;
- 3) измерение межвиткового сопротивления изоляции в фазной обмотке (межвитковое сопротивление фазной обмотки).

Методы, обеспечивающие измерения для первых двух групп, в связи со своей простотой, широко представлены при проведении диагностических процедур по контролю состояния обмоток электрических машин. Однако данные методы минимально характеризуют состояние изоляции токоведущих частей самих обмоток и в большей степени направлены на обеспечение безопасности при эксплуатации оборудования для человека от поражения электрическим током.

Методы, характеризующие третью группу измерений, в связи со своей сложностью и неочевидностью получаемых результатов, в большей степени

направлены на определение наличия в обмотках короткозамкнутых витков, то есть мест, где сопротивление изоляции уже стремится к нулю. А, следовательно, эти методы не имеют разрешающей способности, достаточной для проведения измерения сопротивления межвитковой изоляции даже в пределах сотен и тысяч Ом.

В результате анализа проблем, имеющихся у современных методов контроля состояния изоляции обмоток электрических машин, была поставлена задача разработки методов оценки состояния обмоток, в основу которых положено измерение ослабленного сопротивления дефектной изоляции, в том числе в режиме реального времени непосредственно в технологическом процессе эксплуатации оборудования и построение приборов, основанных на этих методах.

Во второй главе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей влияния уровня дефектного сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин на параметры тока холостого хода, формируются математические зависимости и анализируются факторы, определяющие погрешности измерения заявленным методом.

Экспериментальные исследования, проведенные для различных трехфазных двигателей, показали, что появление в обмотках ЭМ дефектов в виде межвитковых замыканий, в том числе связанные со снижением сопротивления межвитковой изоляции, существенно влияет на параметры тока холостого хода. При этом анализ кривых тока показал, что уменьшение дефектного межвиткового сопротивления оказывает существенное влияние на фазу первой спектральной составляющей при минимальном влиянии на значение начальных фаз остальных, в том числе представленных в виде их суммы (рисунок 2).

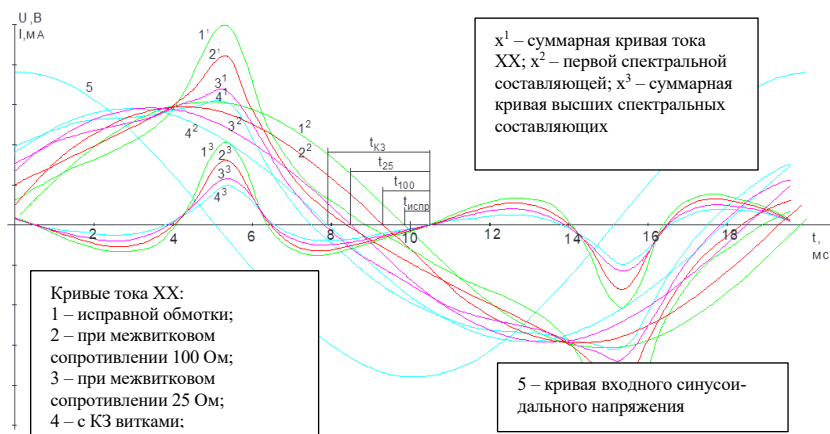


Рисунок 2 – Влияние уровня дефектного межвиткового сопротивления в обмотках асинхронного электрического двигателя АИР63В4У3 на параметры тока холостого хода

Кроме этого, оценка изменения параметров этих кривых, в том числе и измерение изменения начальной фазы первой спектральной составляющей, указал на оптимальность использования в качестве характерных точек точки перехода через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путем сложения высших составляющих, при этом время между этими характерными точками и является информативным параметром при измерении дефектных межвитковых сопротивлений в обмотках диагностируемых электрических машин.

В результате для исследуемых электрических машин получены кривые зависимости величины дефектного межвиткового сопротивления от времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путем сложения высших спектральных составляющих (рисунок 3), которые показали, что в области сопротивлений до 300 Ом, характеристика имеет четкую зависимость, которая может быть использована для оценки состояния обмоток диагностируемых электрических машин. Кроме этого, дополнительные исследования показали, что на изменение сдвига фаз первой спектральной составляющей относительно суммарных влияет только величина межвитковых сопротивлений в обмотках, при этом влияние местоположения дефектов в обмотках, а также количество витков, задействованных в месте дефекта, малозначительно.

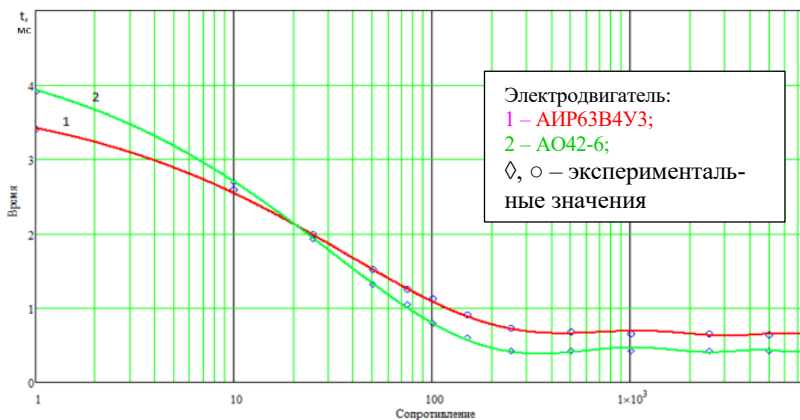


Рисунок 3 – Зависимость времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путем сложения высших спектральных составляющих, от величины дефектного сопротивления межвитковой изоляции для исследуемых электродвигателей

Полученные характеристики для исследуемых асинхронных двигателей позволили сформировать аналитическую зависимость, характеризующую влияние интервала времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путем сложения высших

спектральных составляющих на величину межвиткового сопротивления в дефектной обмотке (1) и рассчитаны коэффициенты полинома для каждого из исследуемых электрических двигателей. При этом относительное отклонение полученной аналитической кривой от экспериментальных значений не превышает 5 %.

$$R(t_{\Delta\varphi}) = a \cdot t_{\Delta\varphi}^0 + b \cdot t_{\Delta\varphi}^{1/2} + c \cdot t_{\Delta\varphi}^1 + d \cdot t_{\Delta\varphi}^{3/2} + e \cdot t_{\Delta\varphi}^2 + f \cdot t_{\Delta\varphi}^{5/2}, \quad (1)$$

где a, b, c, d, e, f – значения коэффициентов при $t_{\Delta\varphi}$ в полиноме;

$t_{\Delta\varphi}$ – время между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путем сложения высших спектральных составляющих.

Также в главе дано математическое определение положения характерных точек при определении временного интервала, оценивающего состояние обмоток диагностируемых электрических машин и рассмотрено влияние нестабильности параметров измерительного сигнала на диагностический параметр, которое показало, что погрешность измерения временного параметра, характеризующее состояние обмотки зависит только от нестабильности частоты сетевого напряжения ω и имеет вид:

$$\Delta t_{13} = \frac{\delta t_{13}}{\delta \omega} \Delta \omega + \frac{\delta t_{13}}{\delta \varphi_{13}} \cdot \frac{\delta \varphi_{13}}{\delta \omega} \Delta \omega. \quad (2)$$

В третьей главе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния параметров дефектов в обмотках электрических машин на частотные характеристики обмоток путем измерения разности фаз сигналов, получаемых с двух плеч измерительного моста, формируемого обмотками контролируемой электрической машины, строятся аналитические зависимости и анализируются факторы, определяющие погрешности измерения заявленным методом.

Анализ фазочастотных характеристик (ФЧХ) для различных 3-х фазных двигателей показал, что они имеют явно выраженный частотный максимум в диапазоне частот от 30 до 80 кГц, величина которого в зависимости от типа двигателя, увеличивается при витковом замыкании в несколько раз. Область этого частотного максимума является оптимальной для использования ее при определении дефектов. На более низких частотах изменение характеристик от возникновения виткового замыкания незначительно, а при более высоких частотах существенно оказываются влияния неравенств распределенных индуктивностей и емкостей фаз обмоток, связанных с рядом неконтролируемых технологических факторов, таких как неравномерность толщины изоляции, разная степень отгиба и увязки лобовых частей, порядок расположения витков в катушке и т. д. Оценка погрешностей при измерении межвитковых сопротивлений показала, что использование мощных источников сигналов приводит к получению невысокой стабильности сигнала по амплитуде и частоте, а суммарная погрешность от нестабильности этих параметров может превышать 10 %. Использование измерения фазовых соотношений существенно снижает влияние нестабильности этих параметров. При этом погрешность не зависит от точности установки и нестабильности амплитуды диагностического сигнала ΔU и нестабильности преобразования

амплитуды устройствами, входящих в реализуемую систему ΔU_n и, тем самым общая погрешность измерения уменьшается более чем в 2 раза.

Экспериментальные исследования показали зависимость влияния параметров исследуемых электрических двигателей (мощность, номинальное напряжение работы) и состояние их обмоток на величину максимума в резонансной области ФЧХ. Рисунок 4 отображает влияние минимального межвиткового сопротивления в месте дефекта на уровень максимума разности фаз между исправной и неисправной обмоткой для исследуемого асинхронного двигателя КР71.1/4 и составляет более 50 градусов при короткозамкнутом витке и стремится к нулю при исправной обмотке.

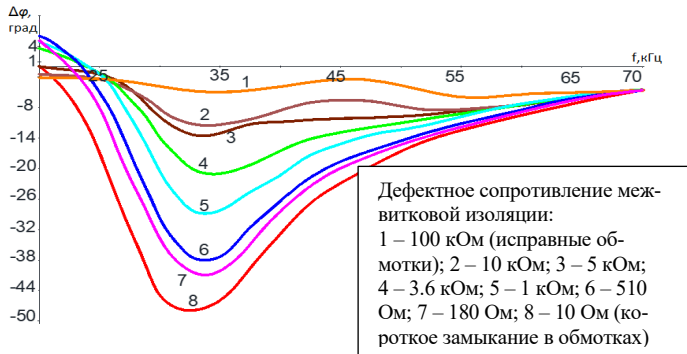


Рисунок 4 – ФЧХ асинхронного двигателя КР71.1/4 при разных значениях дефектного сопротивления межвитковой изоляции в обмотках

Исследования других ЭМ показал аналогичные значения. Как результат, были получены зависимости максимума фазо-частотной характеристики исследуемых асинхронных двигателей от межвитковых сопротивлений в неисправной обмотке (рисунок 5) и получена аналитическая зависимость частотного максимума от мощности диагностируемого оборудования

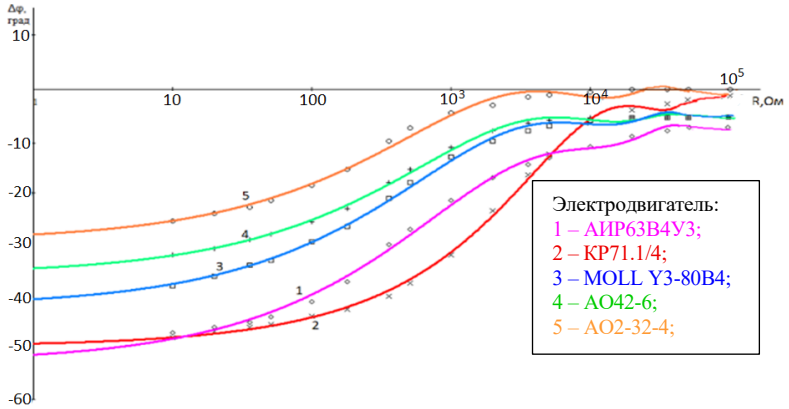
$$\Delta\varphi_i(R) = a_i \cdot R^0 + b_i \cdot R^{1/2} + c_i \cdot R^1 + d_i \cdot R^{3/2} + e_i \cdot R^{5/2}, \quad (3)$$

где a, b, c, d, e – значения коэффициентов при R в полиноме;

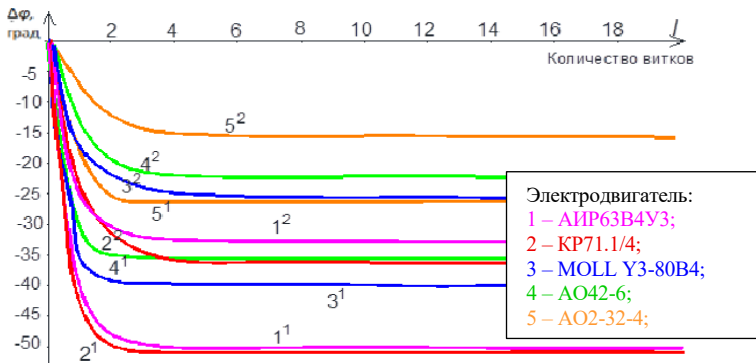
i – номер выбранного асинхронного двигателя;

R – сопротивление в месте дефекта.

Аналогичные экспериментальные исследования показали зависимость величины максимума ФЧХ от местоположения дефекта в обмотках и количества поврежденных витков в месте дефекта, в результате чего были получены соответствующие зависимости (рисунок 6 и рисунок 7) и характеризующие их аналитические выражения 5 и 6.



Δ , \diamond , \circ – измеренные значения максимума фазочастотных характеристик при соответствующих сопротивлениях изоляции в месте дефекта
Рисунок 5 – Зависимость максимума ФЧХ асинхронных двигателей от сопротивления межвитковой изоляции в неисправной обмотке



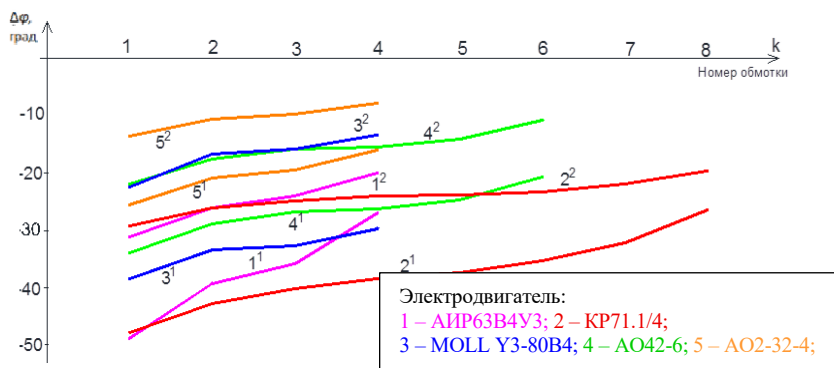
Сопротивление в месте дефекта: x^1 – 10 Ом; x^2 – 1 кОм

Рисунок 6 – Зависимость величины максимума ФЧХ для исследуемых асинхронных двигателей при различных значениях уровня межвиткового сопротивления от числа витков, задействованных в дефекте

$$\Delta\varphi_{i,R}(l) = a_i \cdot l^0 + b_i \cdot l^{1/2} + c_i \cdot l^1 + d_i \cdot l^{3/2} + e_i \cdot l^{5/2}, \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_i(k) = a_i \cdot k^0 + b_i \cdot k^{1/2} + c_i \cdot k^1 + d_i \cdot k^{3/2} + e_i \cdot k^{5/2}, \quad (5)$$

где a, b, c, d, e – значения коэффициентов при k и l в полиноме соответственно;
 i – номер выбранного АД;
 l – номер катушки с пониженным межвитковым сопротивлением.
 k – количества замкнутых витков в месте дефекта.



Сопротивление в месте дефекта x^1 – 10 Ом; x^2 – 1 кОм

Рисунок 7 – Зависимость величины максимума фазочастотной характеристики для исследуемых асинхронных двигателей при различных значениях уровня межвиткового сопротивления от номера дефектной секции

Как результат была получена комплексная зависимость влияния межвиткового сопротивления и места дефекта на уровень разности фаз, получаемых в измерительной системе (рисунок 8), позволившая характеризовать величину сопротивления межвитковой изоляции в обмотках диагностируемых двигателей в области исправной ЭМ (до 100 кОм) с погрешностью до 30 %.

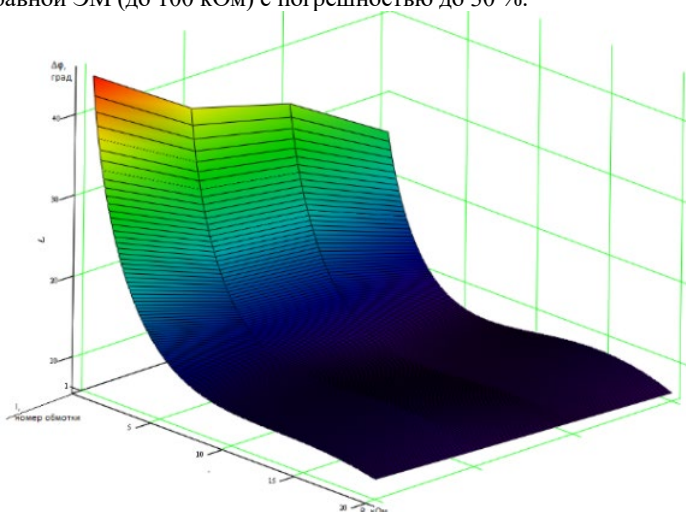


Рисунок 8 – Комплексная зависимость влияния межвиткового сопротивления и места дефекта в обмотках электродвигателя АИР63В4У3 на величину разности фаз

В четвертой главе рассмотрены принципы использования импульсных последовательностей для измерения изменения временных параметров, а также для формирования измерительных сигналов. В том числе оценены погрешности, связанные с формированием испытательных импульсных последовательностей.

Использование синусоидальных испытательных сигналов, учитывая невысокую стабильность его параметров при формировании, приводит к большим погрешностям измерения. Вследствие этого, целесообразней использовать составляющие сигнала той же частоты, полученные из последовательности импульсов с заданными амплитудой и временными параметрами, и, таким образом, использовать их преимущества при получении высокой стабильности временных параметров.

Так выражение для амплитуды спектральных составляющих импульсной последовательности имеет вид:

$$|U(n)| = \frac{2^K E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_i}{2} \right| \prod_{L=1}^K \left| \cos \frac{n\omega t_{zL}}{2} \right|, \quad (6)$$

где E – амплитуда импульсов;

t_i – длительность импульсов;

n – номер спектральной составляющей;

ω – циклическая частота импульсной последовательности;

K – количество блоков импульсов в последовательности;

t_{zL} – время задержки между блоками импульсов;

При этом длительность импульса и время задержки их повторения выбирают таким образом, чтобы спектральные составляющие, соседние с информативной, были равны нулю. Это позволяет существенно увеличить добротность выделения. При этом погрешности, связанные с нестабильностью измерительного сигнала, составляют 10^{-2} – 10^{-4} %.

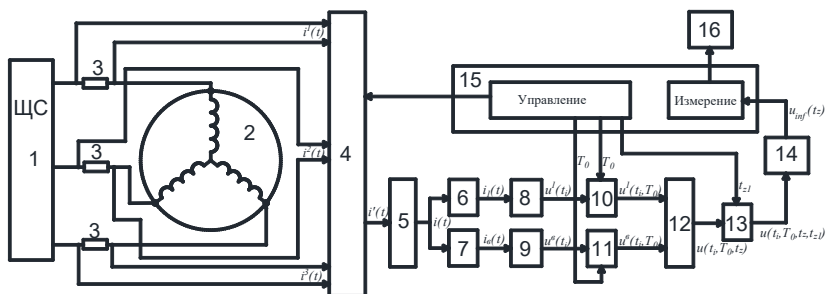
Кроме этого, одной из основных проблем является измерение временных интервалов, когда в качестве испытательного сигнала выступает напряжение сети, нестабильность основных параметров которого достигает десятка процентов, в том числе по частоте и наличию высших гармоник, т. е. находится в пределах уровня измеряемых параметров. Для увеличения чувствительности и уменьшения погрешности представленного в главе 2 способа измерения сдвига начальной фазы первой гармоники тока холостого хода, разработан способ измерения временных интервалов на основе создания парных импульсных последовательностей, где информативным параметром является время задержки между двумя двойными импульсами в последовательности, величина которой определяет нуль в амплитудно-частотном спектре полученной последовательности. И задавая параметры импульсной последовательности, в амплитудно-частотном спектре выбирают спектральную составляющую, амплитуда которой не зависит от времени задержки между импульсами и минимально чувствительна к нестабильности частоты измерительного сигнала. При этом оценены погрешности при формировании испытательного импульсного сигнала и определены чувствительности амплитудно-частотного спектра к изменению параметров формируемой импульсной последовательности, а также проведен анализ влияния дестабилизирующих

факторов при формировании импульсных последовательностей на информативные параметры, и влияние изменения несущей частоты, как основного информативного параметра на нестабильность основных параметров прерывистой импульсной последовательности при измерении временных параметров. Погрешность получаемой импульсной последовательности, связанная с нестабильностью, возникающей при некоррелированных изменениях ее параметров, может составлять до 10^{-4} %.

В пятой главе рассмотрен принцип построения системы для измерения сопротивления межвитковой изоляции в обмотках трехфазных электрических машин. Так же здесь приводятся описания разработанных функциональных структур, их схемотехническая и конструктивная реализации.

Измерительная система представляет собой комбинацию двух приборов, которые реализуют измерение ослабленного сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин на соответствующих этапах их функционирования в течении рабочего цикла.

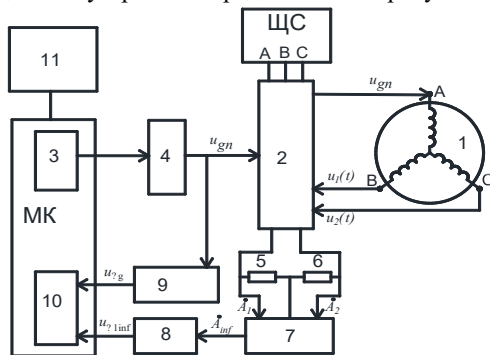
Первый прибор отслеживает работоспособное состояние диагностируемой электрической машины путем измерения ослабленных межвитковых сопротивлений в каждой обмотке в режиме реального времени по анализу тока холостого хода непосредственно во время ее рабочего цикла. В этом режиме оценивается сопротивление в пределах до 300 Ом с погрешностью до 5 %. Данный прибор позволяет оценить текущую работоспособность ЭМ и выявить дефекты в обмотках, не постоянные во времени. Общая структура прибора представлена на рисунке 9.



- 1** – генератор синусоидального напряжения (ввод 380 В); **2** – обмотки электрической машины; **3** – преобразователь ток-напряжение;
4 – коммутатор; **5** – блок развязки; **6** – фильтр высокой частоты; **7** – фильтр низкой частоты; **8, 9** – триггеры; **10, 11** – формирователи импульсов с управляемыми параметрами; **12** – сумматор; **13** – повторитель импульсов;
14 – избирательный блок с регулируемой частотой пропускания;
15 – устройство управления; **16** – индикатор

Рисунок 9 – Структурная схема прибора для измерения ослабленного межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин по анализу тока холостого хода

Второй прибор отслеживает исправное состояние диагностируемой электрической машины перед началом функционирования (определение исходной работоспособности ЭМ) или по завершению рабочего процесса (состояние рабочего температурного режима) способом измерения дефектных сопротивлений межвитковой изоляции в обмотках путем сравнения их параметров. В этом режиме оценивается сопротивление в пределах до 100 кОм с погрешностью от 5 до 30 % (в зависимости от уровня дефекта в обмотке). Данная часть позволяет выявить начало дефектообразования в обмотках ЭМ на максимально ранних стадиях. Общая структура данного устройства представлена на рисунке 10.



1 – обмотки электрической машины; **2** – коммутатор; **3** – генератор испытательного напряжения; **4** – усилитель мощности; **5, 6** – измерительные резисторы; **7** – смеситель сигналов; **8** – избирательное устройство испытательного сигнала; **9** – избирательное устройство суммы снимаемых сигналов; **10** – фазовый детектор; **11** – индикатор
Рисунок 10 – Структурная схема прибора измерения дефектного межвиткового сопротивления по относительному сдвигу фаз сигналов, получаемых с двух обмоток диагностируемой электрической машины

На основе структурных схем и описанных методов был построен лабораторно-испытательный стенд для оценки состояния обмоток трехфазных синхронных и асинхронных двигателей со всыпной обмоткой путем измерения дефектных сопротивлений межвитковой изоляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлен эффект зависимости временного интервала между точками перехода через нуль кривой первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой выших спектральных составляющих от значения сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин, что позволяет использовать его в качестве принципа измерения межвиткового сопротивления изоляции обмоток электрических машин в процессе их эксплуатации [1; 3; 10–12; 16].

2. Разработан метод измерений сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин, заключающийся в оценке параметров спектральных составляющих тока холостого хода, протекающего в фазных обмотках электрических машин в процессе их эксплуатации, отличающейся измерением временного интервала между точками перехода через нуль кривой первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой высших спектральных составляющих, что позволяет измерять значение сопротивления межвитковой изоляции в диапазоне от 1 Ом до 300 Ом с погрешностью не более 5 % и тем самым идентифицировать неработоспособное, предотказное и работоспособное состояние электрических машин в процессе их эксплуатации [2; 5; 17; 18; 20; 22–24].

3. Установлен эффект зависимости разности фаз сигналов полученных с двух плеч измерительного моста, формируемого обмотками электрической машины, от значения сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин, что позволяет использовать его в качестве принципа измерения сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин в процессе проведения диагностических процедур на испытательном стенде [4; 13–15; 19].

4. Разработан метод измерений сопротивления межвитковой изоляции обмоток электрических машин, заключающейся в оценке параметров сигналов, полученных с двух плеч измерительного моста, формируемого обмотками электрической машины, отличающейся измерением разности фаз сигналов, формируемых в резонансной области частот, характерных обмоткам диагностируемой электрической машины, что позволяет измерять сопротивление межвитковой изоляции в диапазоне от 1 Ом до 100 кОм с погрешностью не более 30 % и тем самым идентифицировать неработоспособное, предотказное, работоспособное и исправное состояние электрических машин в процессе испытания на стенде [5; 6; 7–9; 19–23; 25].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные в диссертационной работе научно-технические решения рекомендуются использовать в новых разработках научного оборудования, а также оборудования для неразрушающего контроля и диагностики состояния обмоток трехфазных электрических машин.

Разработанная система измерения межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин использовалась в установках диагностирования электродвигателей на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации (ремонтные лаборатории ООО «БелГидросилаГрупп», (филиалы г. Минск, г. Санкт-Петербург, г. Калининград), ООО «Вэдэм-сервис»), ЧПУП «Металл-Хот», г. Борисов.

Разработанные в диссертационной работе методы измерения сопротивления в дефектных обмотках и принципы организации импульсных последовательностей использованы в учебном процессе на кафедре «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Isaev, A. V. Increasing of the accuracy of signals' time parameters measuring using double pulse trains / A. V. Isaev, U. V. Suchodolov, A. S. Sushko, A. A. Sheinikau // Приборы и методы измерений. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 323–331.
2. Исаев, А. В. Определение дефектов обмоток электрических машин по параметрам спектра тока холостого хода / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, С. В. Сизиков, А. А. Шейников // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 1. – С. 17–21.
3. Исаев, А. В. Динамическая модель структуры спектра последовательностей двойных импульсов / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, А. А. Шейников // Вести национальной академии наук. Серия физико-технических наук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 94–104.
4. Исаев, А. В. Возможность определения дефектов в обмотках электрических машин частотными методами / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, В. В. Зеленко, С. В. Сизиков // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 3. – С. 10–17.
5. Исаев, А. В. Оценка состояния электрических машин на основе математического моделирования дефектообразования в обмотках / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, Д. В. Балахонов // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 302–313.
6. Исаев, А. В. Анализ состояния электрических машин путем измерения межвиткового сопротивления в его обмотках / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 126–134.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Исаев, А. В. Функциональный генератор испытательных импульсов / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, С. В. Сизиков // Электроэнергетика и электротехника: сборник трудов международной научно-технической конференции, 21 мая 2019 г, г. Воронеж, Россия – Воронеж : Международный институт компьютерных технологий. – С. 148–153.
8. Исаев, А. В. Определение спектра намагничивающего тока электрических машин при дефектах в обмотках / А. В. Исаев, В. В. Зеленко, С. В. Сизиков // Приборостроение-2020 : материалы 13-й Международной научно-технической конференции, 18–20 ноября 2020 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 61–62.
9. Шейников, А. А. Оценка скорости формирования гармонических составляющих квазипериодических измерительных сигналов / А. А. Шейников, А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов // Приборостроение-2020 : материалы 13-й Международной научно-технической конференции, 18–20 ноября 2020 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 57–59.
10. Исаев, А. В. Определение спектра намагничивающего тока трансформатора при дефектах в обмотках / А. В. Исаев, В. В. Зеленко, С. В. Сизиков // Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации: сборник трудов международной

научно-технической конференции, 19 мая 2020 года, г. Воронеж, Россия – Воронеж : Международный институт компьютерных технологий. – С. 45–48.

11. Исаев, А. В. Частотные характеристики и схемы замещения обмоток асинхронных электродвигателей / А. В. Исаев, В. В. Зеленко, С. В. Сизиков // Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации: сборник трудов международной научно-технической конференции, 19 мая 2020 года., г. Воронеж, Россия – Воронеж : Международный институт компьютерных технологий. – С. 41–44.

12. Исаев, А. В. Обнаружение дефектов обмоток асинхронных электродвигателей путем анализа частотных характеристик / В. В. Зеленко, А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов // Энергетика Беларуси-2020 [Электронный ресурс]: сборник научных работ Республиканской научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЭФ БНТУ, 10 ноября 2020 года. / редкол.: Е. Г. Пономаренко, Н. В. Шведко. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 79–80.

13. Исаев, А.В. Анализ влияния сопротивления замкнутого контура обмотки трансформатора / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, С. В. Сизиков // Энергетика Беларуси-2021 [Электронный ресурс]: материалы Республиканской научно-практической конференции, 26 мая 2021 года. / сост. И. Н. Прокопеня. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 120–122.

14. Исаев, А. В. Увеличения точности измерения временных параметров при нестабильности параметров импульсных сигналов / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, В. В. Зеленко // Приборостроение-2021 : материалы 14-й Международной научно-технической конференции, 17–19 ноября 2021 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 71–73.

15. Исаев, А. В. Измерительная система диагностики состояния обмоток электрических машин по току холостого хода / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов // Приборостроение-2021 : материалы 14-й Международной научно-технической конференции, 17–19 ноября 2021 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 73–75.

16. Исаев, А. В. Контроль состояния электромагнитных устройств с ферромагнитным сердечником / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, С. В. Сизиков, В. В. Зеленко // Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации: сборник трудов международной научно-технической конференции, 18 мая 2021 года, г. Воронеж, Россия – Воронеж : Международный институт компьютерных технологий. – С. 60–64.

17. Исаев, А. В. Диагностика состояния электрических машин способами, использующими резонансные явления в обмотках / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16–18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 35–37.

18. Исаев, А. В. Методика получения стабильных контрольно-диагностических сигналов / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, В. В. Зеленко // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции,

16–18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 31–33.

19. Исаев, А. В Повышение добротности анализируемых спектральных составляющих при контроле электрооборудования / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, В. В. Зеленко, С. В. Сизиков // Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации: сборник трудов международной научно-технической конференции, 26 мая 2022 года., г. Воронеж, Россия – Воронеж : Международный институт компьютерных технологий. – С. 33–36.

20. Исаев, А. В Организация диагностики состояния обмоток электрических машин / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов, С. В. Сизиков // Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации: сборник трудов международной научно-технической конференции, приуроченной к 30-летию ВУЗа, 26 мая 2022 года, г. Воронеж, Россия – Воронеж : Международный институт компьютерных технологий. – С. 37–40.

21. Исаев, А. В Оценка возможности определения состояния обмоток трехфазных двигателей частотными методами / А. В. Исаев, Ю. В. Суходолов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: сборник трудов международной научно-технической конференции, 20–21 апреля 2023 года, г. Могилев, Республика Беларусь – Могилев : Белорусско-Российский университет. – С.336–337.

22. Исаев, А. В Оценка состояния обмоток электрических машин по величине межвиткового сопротивления / А. В. Исаев [и др.] // Энергетика Беларуси-2023: материалы Республиканской научно-практической конференции, 25–26 мая 2023 года / сост. И. Н. Прокопеня. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 54-59.

23. Исаев, А. В Диагностический комплекс контроля состояния обмоток электрических машин / А. В. Исаев [и др.] // Приборостроение-2023 : материалы 16-й Международной научно-технической конференции, 15–17 ноября 2023 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 17–19.

Патенты и заявки на изобретения

24. Способ контроля состояния обмоток трехфазных электрических машин / Уведомление о получении заявки на выдачу патента на изобретение № а20230102 от 29.04.23 / Исаев А. В, Суходолов Ю. В.

25. Устройство для контроля межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин. Уведомление о получении заявки на выдачу патента на изобретение № а20230101 от 29.04.23 / Исаев А. В, Суходолов Ю. В.

РЭЗІЮМЭ

Ісаеў Аляксандр Віталевіч

СПЕКТРАЛЬНА-ІМПУЛЬСНЫЯ МЕТАДЫ ВЫМЯРЭННЯ СУ- ПРАЦІВАННЯ МІЖВІТКОВАЙ ІЗАЛЯЦЫІ ЭЛЕКТРЫЧНЫХ МАШЫН СА ВЫПЫМНАЙ АБМОТКАЙ І ПРЫБОРЫ НА ІХ АСНОВЕ

Ключавыя словы: супраціў міжвітковай ізаляцыі, дэфектная абмотка, спектральныя складнікі току халастога ходу, спектр парных імпульсаў.

Мэта працы: распрацоўка метадаў вымярэння саслабленага супраціву міжвітковай ізаляцыі ў абмотках электрычных машын і пабудова на іх аснове вымяральных прыбораў, якія дазваляюць выяўляць іх няспраўны стан на ранніх стадыях дэфектаўтварэння.

Метады даследавання: матэматычнае і фізічнае мадэляванне эфектаў, якія праходзяць у абмотках электрычных машын з улікам уплыву ўзроўню супраціву ў месцы дэфекту. Эксперыментальныя доследы праводзіліся шляхам натурнага мадэлявання фізічных працэсаў з ужываннем сучаснай кантрольна-вымяральнай тэхнікі. Дакладнасць атрыманых тэарэтычных вынікаў ацэньвалася шляхам іх супастаўлення з вынікамі эксперыментаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны метады і выраблена на іх аснове прыборы для ацэнкі стану абмотак электрычных машын шляхам вымярэння ў іх супраціву міжвітковай ізаляцыі. Распрацаваны метады вымярэння супраціву міжвітковай ізаляцыі ў дэфектнай абмотцы па адноснай змене значэння пачатковых фаз спектральных складнікаў току халастога ходу. Распрацаваны метады вымярэння дэфектных межвітковых супраціваў у абмотцы па фазавых суадносінах сігналаў, атрыманых з двух плячэй вымяральнага маста, фармаванага абмоткамі электрычнай машыны. Распрацаваны метады фармавання сігналаў для вымярэння дэфектных міжвітковых супраціваў у абмотках электрычных машын, заснаваныя на пабудове імпульсных паслядоўнасцяў з перавагай у іх інфарматыўных спектральных складнікаў, параметры якіх не залежаць ад нестабільнасці параметраў зыходнага сігнала.

Ступень выкарыстання. На аснове распрацаваных у рамках дысэртацыйнай работы навукова-тэхнічных рашэнняў пабудаваны дыягнастычныя стэнды для кантролю працаздольнасці электрычных машын рэалізаваныя на рамонтных участках прадпрыемстваў Рэспублікі Беларусь. Вынікі даследавання ўкаранены ў адукацыйны працэс.

Вобласць прымянення: ацэнка стану абмотак электрычных машын на прадпрыемствах па вырабе, абслугоўванні і (або) рамонце адпаведнага абсталявання.

РЕЗЮМЕ

Исаев Александр Витальевич

СПЕКТРАЛЬНО-ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН СО ВСЫПНОЙ ОБМОТКОЙ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Ключевые слова: сопротивление межвитковой изоляции, дефектная обмотка, спектральные составляющие тока холостого хода, спектр парных импульсов.

Цель работы: разработка методов измерения ослабленного или дефектного межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин и построение на их основе измерительных систем, обеспечивающих определение образования дефектов в них.

Методы исследования: математическое и физическое моделирование эффектов, протекающих в обмотках электрических машин с учетом влияния уровня сопротивления в месте дефекта. Экспериментальные исследования проводились путем натурного моделирования физических процессов с применением современной контрольно-измерительной техники. Достоверность полученных теоретических результатов оценивалась путем их сопоставления с результатами экспериментов.

Полученные результаты и их новизна: разработаны методы и изготовлена на их основе приборы для оценки состояния обмоток электрических машин путем измерения в них сопротивления межвитковой изоляции. Разработан метод измерения сопротивления межвитковой изоляции в дефектной обмотке по относительному изменению значения начальных фаз спектральных составляющих тока холостого хода. Разработан метод измерения дефектных межвитковых сопротивлений в обмотке по фазовым соотношениям сигналов, полученных с двух плеч измерительного моста, формируемого обмотками электрической машины. Разработаны методы формирования сигналов для измерения дефектных межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, основанные на построении импульсных последовательностей с преобладанием в них информативных спектральных составляющих, параметры которых не зависят от нестабильности параметров исходного сигнала.

Степень использования. На основе разработанных в рамках диссертационной работы научно-технических решений построены диагностические стенды для контроля работоспособности электрических машин, реализованные на ремонтных участках предприятий Республики Беларусь. Результаты исследования внедрены в образовательный процесс.

Область применения: оценка состояния обмоток электрических машин на предприятиях по изготовлению, обслуживанию и (или) ремонту соответствующего оборудования

SUMMARY

Isaev Alexander Vitalievich

SPECTRAL-PULSE METHODS FOR MEASURING THE RESISTANCE OF INTERTURN INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES WITH LONG WINDINGS AND DEVICES BASED ON THEM

Key words: interturn insulation resistance, defective winding, spectral components of no-load current, spectrum of paired pulses.

Purpose of the work: to develop methods for measuring the weakened resistance of interturn insulation in the windings of electrical machines and to build measuring instruments on their basis that make it possible to identify winding insulation's faulty state in the early stages of defect formation.

Research methods: mathematical and physical modeling of the effects occurring in the windings of electrical machines, taking into account the influence of the resistance level at the location of the defect. Experimental studies were carried out by full-scale modeling of physical processes using modern control and measuring equipment. The reliability of the obtained theoretical results was assessed by comparing them with experimental results.

The results obtained and their novelty: methods have been developed and derived instruments have been manufactured for assessing the condition of the windings of electrical machines by measuring the interturn insulation resistance in them. A method has been developed for measuring the resistance of interturn insulation in a defective winding by the relative change in the value of the initial phases of the spectral components of the no-load current. A method has been developed for measuring defective interturn resistance in a winding using the phase relationships of signals received from two arms of a measuring bridge formed by the windings of an electrical machine. Methods for generating signals have been developed for measuring defective turn-to-turn resistances in the windings of electrical machines, based on the construction of pulse sequences with a predominance of informative spectral components, the parameters of which do not depend on the instability of the parameters of the original signal.

Extent of use. Based on the scientific and technical solutions developed within the framework of the dissertation work, diagnostic benches were built to monitor the performance of electrical machines and were implemented at repair sites of enterprises in the Republic of Belarus. The results of the research are introduced into the educational process.

Scope of application: assessment of the condition of the windings of electrical machines at enterprises for the manufacture, maintenance and (or) repair of relevant equipment.

Научное издание

ИСАЕВ
Александр Витальевич

**СПЕКТРАЛЬНО-ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН СО ВСЫПНОЙ ОБМОТКОЙ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения

Подписано в печать 18.05.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,39. Тираж 60. Заказ 354.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.