

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 8D07103 – «Электроэнергетика»

**Имангазинова Динара Кенжетаевна**

### **РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ СЕКЦИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Предложенная диссертационная работа посвящена разработке высокочувствительного способа выявления поврежденной секции в трехфазных обмотках электрических машин и осуществлялась в рамках приоритетных направлений развития науки «Энергетика и машиностроение», утвержденных Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан.

**Актуальность.** В электроэнергетике для преобразования электрической энергии в механическую энергию и наоборот используются трехфазные электрические машины. Такое преобразование энергии обычно осуществляется с помощью трехфазных синхронных генераторов (СГ), двигателей (СД) и компенсаторов (СК), а также асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым и фазным ротором. Характерной особенностью всех этих электрических машин является одинаковое исполнение обмотки статора и фазного ротора.

Из практики эксплуатации трехфазных электрических машин известно, что на витковые замыкания (ВЗ) в секционированных и всыпных обмотках статора и фазного ротора электрических машин приходится до 35 и 93% всех отказов этих электрических машин.

Традиционно для защиты низковольтных электрических машин от коротких замыканий в обмотках статора и фазного ротора применяют предохранители и автоматические выключатели, а в высоковольтных электрических машинах – максимальные токовые или дифференциальные защиты, в которых в качестве измерительного преобразователя используют трансформаторы тока. Такие защиты обладают низкой чувствительностью к ВЗ.

В качестве не традиционных защит для этих целей могут использоваться защиты, в которых в качестве измерительного преобразователя может использоваться кольцевой измерительный преобразователь (КИП). Такие защиты имеют повышенную чувствительность к ВЗ. При срабатывании такой защиты в трехфазных обмотках практически всегда образуются секции со «скрытыми» повреждениями в виде короткозамкнутых витков. Как показывает практика эксплуатации электрических машин, если в ней образовалась такая секция, то ее выявление позволит свести ремонт поврежденного статора к «вырезанию» этой секции без значительного ущерба для дальнейшей работы этой электрической машины. В результате стоимость ее ремонта сократится в десятки раз.

Известен способ визуального выявления секции со «скрытыми» повреждениями. В этом способе она выявляется по потемнению ее изоляции. Если таким образом поврежденную секцию найти не удалось, то машину рекомендуется подключать к пониженному напряжению до появления потемнения изоляции поврежденной секции. Основным недостатком такого способа является то, что, перегрев поврежденной секции может привести к нагреву и повреждению изоляции секций, расположенных рядом.

Этого недостатка лишены те способы выявления секции со «скрытыми» повреждениями, в которых контролируемой величиной является магнитное поле замкнутых витков, ток в которых создается с помощью специальных электромагнитных индукторов.

Значительный вклад в разработку таких способов выявления поврежденной секции в трехфазных обмотках электрических машин внесли такие ученые как Деро А.Р., Виноградов Н.В., Перельмутер Н.М., Буневичус Б.А., Эбралидзе Р.В., Гинкас М.Л., Альперавичус Х.А., Новожилов Т.А., Новожилов А.Н, Клецель М.Я. и целый ряд других.

Однако реализация известных способов выявления секции со «скрытыми» повреждениями, в которых контролируемой величиной является магнитное поле тока в короткозамкнутых витках, также обладает значительными недостатками.

Так способ, в котором с помощью электромагнитного индуктора, размещаемого на соседних зубцах магнитопровода статора у одного из его торцов, формируется магнитный поток через плоскость диагностируемой секции, а ток в ее витках измеряется с помощью аналогичного электромагнитного индуктора, расположенного на тех же зубцах у другого торца этого магнитопровода обладает низкой чувствительностью. Это вызвано тем, что в этом случае измеряется не только магнитное поле от тока в замкнутых витках, но и магнитное поле в магнитопровode статора от электромагнитного индуктора, формирующего магнитное поле. Это магнитное поле присутствует в магнитопровode статора и при отсутствии замкнутых витков в диагностируемой секции.

Несколько иначе построен способ выявления короткозамкнутых витков в обмотке статора электрических машин, для реализации которого используются сложная конструкция из индукторов и датчики магнитного поля, которые при диагностике располагаются в области лобовых частей. В связи с этим этот способ можно использовать только на поточной линии производства однотипной электрической машины. Кроме того, он не способен указать место расположения секции со «скрытым» повреждением в обмотке статора. Что приводит к значительному ограничению области его применения.

Известный способ, в котором для выявления секции со «скрытым» повреждением в обмотке статора используется Ш-образный магнитопровод с несколькими обмотками, часть из которых используется для формирования диагностирующего магнитного поля, а с помощью другой части измеряется магнитное поле замкнутых витков. Недостатком этого способа является

то, что такой Ш-образный магнитопровод можно использовать лишь для диагностики электрических машин только с одинаковой величиной зубцового деления. Что значительно ограничивает область его применения.

Таким образом, работа по разработке высокочувствительных способов выявления секции со «скрытым» повреждением в трехфазной обмотке, позволяющих осуществлять диагностику электрических машин с различной величиной зубцового деления, **является актуальной.**

**Объектом исследования** является область диагностирования повреждения обмоток статора и фазного ротора трехфазных электрических машин.

**Предмет исследования** – совершенствование процесса диагностики обмоток статора и фазного ротора трехфазных электрических машин путем использования КИП.

**Целью работы** заключается в разработке высокочувствительных способов выявления секции со «скрытым» повреждением в трехфазной обмотке, позволяющих осуществлять диагностику электрических машин с различной величиной зубцового деления. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Осуществить анализ известных технических решений, предназначенных для обнаружения секции со «скрытым» повреждением в трехфазной обмотке электрических машин.

2. Разработать новый высокочувствительный способ выявления секции со «скрытым» повреждением в трехфазной обмотке, позволяющий осуществлять диагностику электрических машин с различной величиной зубцового деления.

3. На основе классического метода расчета магнитных цепей разработать метод моделирования параметров П – образного электромагнитного индуктора, предназначенного для формирования диагностического магнитного поля и тока в замкнутых витках поврежденной секции со «скрытым» повреждением.

4. На основе метода Био-Савара-Лапласа разработать метод расчета ЭДС на выходе КИП от тока в замкнутых витках секции со «скрытым» повреждением.

5. Предложить метод определения диапазона величины зубцового деления магнитопроводов статора и фазного ротора для машин мощностью 20-5000кВт с произвольным числом пар полюсов.

6. Разработать универсальную конструкцию П – образного электромагнитного индуктора, который позволит осуществлять поиск секции со «скрытым» повреждением в машинах мощностью 20-5000кВт с любой величиной зубцового деления.

7. Разработать конструкции стационарного и передвижного КИП для осуществления поиска секции со «скрытым» повреждением в электрических машинах, на которых КИП не установлен.

**Инструментом в получении материалов исследования** являются:

- ряд разделов математики и теоретических основ электротехники;

- основные положения теории электрических машин;
- основные положения теории релейной защиты и диагностики;
- теоретические исследования с помощью программного комплекса ELCUT и Turbo BASIC.

**Научная новизна** работы определена тем, что:

1. Путем сопоставления достоинств и недостатков известных способов диагностики повреждений в трехфазных обмотках выявлено, что для поиска секции со «скрытым» повреждением в наибольшей степени подходят те, в которых с помощью электромагнитного индуктора индуцируется ток в замкнутых витках.

2. Разработан новый способ поиска секции со «скрытым» повреждением в трехфазных обмотках, по которому токи, индуцируемые в замкнутых витках с помощью электромагнитного индуктора, измеряются с помощью КИП.

3. На основе классического метода расчета магнитных цепей разработан метод моделирования параметров П – образного электромагнитного индуктора, предназначенного для формирования диагностического магнитного поля и тока в замкнутых витках поврежденной секции со «скрытым» повреждением.

4. На основе метода Био-Савара-Лапласа разработан метод расчета ЭДС на выходе КИП от тока в замкнутых витках секции со «скрытым» повреждением.

5. Предложен метод определения диапазона величины зубцового деления магнитопроводов статора и фазного ротора для машин мощностью 20-5000кВт с произвольным числом пар полюсов.

6. Разработана универсальная конструкция П – образного электромагнитного индуктора, которая позволяет осуществлять поиск секции со «скрытым» повреждением в машинах мощностью 20-5000кВт с любой величиной зубцового деления.

7. Разработаны конструкции стационарного и передвижного КИП для осуществления поиска секции со «скрытым» повреждением в электрических машинах, на которых КИП не установлен.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что:

1. Анализ известных способов поиска секции со «скрытым» повреждением в трехфазных обмотках, в которых измеряемой величиной является магнитное поле короткозамкнутых витков, ток в которых индуцируется с помощью электромагнитного индуктора, позволили определить пути их совершенствования.

2. Реализация разработанного способа поиска секции со «скрытым» повреждением в трехфазных обмотках, по которому магнитное поле тока, индуцируемого в замкнутых витках с помощью электромагнитного индуктора, измеряется с помощью КИП, позволяет определять место расположения секции со «скрытым» на магнитопроводе с произвольной величиной зубцового деления вне зависимости от числа замкнутых витков.

3. Разработанный метод моделирования основного параметра  $\Pi$  – образного электромагнитного индуктора в виде зависимости тока в его обмотке от магнитного потока в воздушном зазоре и программа Ind1 в редакторе Turbo BASIC позволяют моделировать его с погрешностью равной 5,6%.

4. Разработанный метод моделирования основного параметра  $\Pi$  – образного электромагнитного индуктора в виде зависимости тока в его обмотке от магнитного потока в воздушном зазоре с помощью программного комплекса ELCUT обеспечивает погрешность моделирования, не превышающую 2%.

5. Предложенный метод расчета тока в замкнутых витках секции со «скрытым» повреждением возникающего под воздействием магнитного потока  $\Phi_{\delta}$  пересекающего плоскость этой секции созданного электромагнитным индуктором и программа Tok-1 в Turbo BASIC для его реализации позволили рассчитывать его величину в зависимости от схемы соединений обмотки и числа замкнутых витков.

6. Разработанный метод расчета ЭДС на выходе многовиткового КИП от тока в замкнутых витках секции со «скрытым» повреждением и программа E1-kip в Turbo BASIC позволили рассчитывать ее величину в зависимости от места расположения этого КИП относительно лобовых частей трехфазной обмотки.

8. Предложенный метод определения величины зубцового деления магнитопроводов статора и фазного ротора в зависимости от мощности электрической машины показывает, что в интервалах мощностей 20-5000кВт вне зависимости от числа пар полюсов его величина может принимать значения равные 0,01-0,038 метра.

9. Разработанная универсальная конструкция  $\Pi$  – образного электромагнитного индуктора с различной формой ножек позволяет использовать его для поиска секции со «скрытым» повреждением в трехфазных обмотках, практически всех выпускаемых промышленностью электрических машин.

10. Разработанная универсальная конструкции стационарного и передвижного КИП дает возможность осуществить поиск секции со «скрытым» повреждением практически у всех выпускаемых промышленностью электрических машин, не имеющих КИП.

**Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами.** Исследования по теме диссертации осуществлялись в рамках приоритетных направлений развития науки «Энергетика и машиностроение», утвержденных высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан.

#### **Внедрение результатов.**

Теоретические и практические результаты работ могут с успехом использоваться на производстве и в учебном процессе бакалавров, магистров и докторов PhD. Произведены производственные испытания способа диагностики состояния обмоток статора электрических машин на ТОО

«Экибастузская ГРЭС-1» имени Б. Нуржанова. Имеется акт приема, представленный в (Приложении Б).

**Апробация результатов исследования:**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на – 12-й международной научно-практической конференции молодых ученых «Энергетика и энергетические техника и технологии» (Москва, 2024).

**Публикации.** Содержание диссертации нашло отражение в 8 печатных работах, в том числе, одна в журнале «Russian Engineering, входящим в базу цитирования Scopus, три в журналах рекомендованных ВАК РК, одна в журналах рекомендованных ВАК РФ, одна в сборнике международных конференций, а также получены 2 патента на изобретение (Приложение А).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх разделов и заключения, изложенных на 85 страницах машинописного текста. Она содержит список использованных источников из 55 наименования, 52 рисунков, 6 таблиц, и пять приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическое значение полученных результатов, указаны пути реализации сформулированных в диссертации задач.

**В первой главе** рассмотрены конструкционные особенности электрических машин с трехфазными обмотками. Установлено, что используемые в электроэнергетике трехфазные синхронные генераторы, двигатели и компенсаторы, а также трехфазные асинхронные генераторы, двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором имеют одинаковое исполнение статора и его обмотки.

Установлено, что основной причиной возникновения виткового замыкания в трехфазной обмотке является повреждение ее изоляции, возникающее под воздействием электрических, тепловых и механических воздействий, а также под воздействием окружающей среды.

В связи с этим в низковольтных электрических машинах с всыпными трехфазными обмотками на витковые замыкания приходится до 93% от всех коротких замыканий в этих обмотках. В свою очередь в высоковольтных электрических машинах с секционированными обмотками статора на витковые замыкания приходится до 33,3% от всех коротких замыканий в этих обмотках.

При этом установлено, что традиционные защиты от коротких замыканий в трехфазных обмотках статора и ротора, работа которых основана на измерении токов фаз или их составляющих, обладают низкой чувствительностью к витковым замыканиям. Отключить замыкание малого числа витков в трехфазных обмотках способны только нетрадиционные защиты, работа которых основана на измерении магнитных потоков лобового рассеяния этих обмоток. При этом использование таких высокочувствительных защит, как правило, сопровождается образованием секции со «скрытым» повреждением.

Проведенный в этой работе анализ известных методов определения секции со «скрытым» повреждением, те методы, обнаружение поврежденной секции в которых сопровождается ее нагревом нельзя считать приемлемыми. В связи с этим более перспективными можно считать те методы, в которых для поиска поврежденной секции используется магнитное поле, возбуждаемое, например, с помощью специального магнитного индуктора

Таким образом, сформулирована актуальная задача разработки нового высокочувствительного, неразрушающего и универсального способа нахождения секции со «скрытым» повреждением. В качестве наиболее перспективного направления определён подход, основанный на возбуждении тока в повреждённых витках с помощью П – образного индуктора и измерения магнитного поля токов в замкнутых витках с помощью кольцевого измерительного преобразователя.

**Во второй главе** рассмотрены теоретические аспекты разработки способов выявления поврежденных секций в трёхфазных обмотках, основанных на применении кольцевого измерительного преобразователя (КИП) и П-образного электромагнитного индуктора.

На основе анализа существующих методов предложены новые способы диагностики обмоток статора и фазного ротора. Сущность методов заключается в возбуждении тока в короткозамкнутых витках поврежденной секции с помощью магнитного потока, создаваемого индуктором, установленным на зубцах магнитопровода, и последующем бесконтактном измерении магнитного поля этого тока с помощью КИП. Разработаны и проанализированы схемы реализации способов, как для машин, оборудованных КИП, так и для машин без него, включая диагностику фазного ротора.

Разработаны и обоснованы математические методы для проектирования и моделирования ключевых элементов диагностической системы, которые позволят:

- моделировать магнитное поле в воздушном зазоре П – образного индуктора с помощью разработанной программа Ind4 в Turbo BASIC и с помощью программного комплекса ELCUT с погрешностью моделирования равной 5.6% и 2% соответственно;

- рассчитывать величину тока наводимого в замкнутых витках поврежденной секции с помощью разработанной программы Tok-1 в Turbo BASIC;

- рассчитывать величину ЭДС КИП от поля повреждённых витков с помощью разработанной программы E1- kip в Turbo BASIC в зависимости от расстояния между этим КИП и сердечником статора.

Таким образом, во второй главе сформирован комплексный теоретико-методический аппарат, обеспечивающий проектирование и расчёт всех ключевых компонентов высокочувствительной системы диагностики «скрытых» витковых замыканий в трёхфазных обмотках электрических машин различной конструкции.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы расчёта, конструирования и практической реализации, для диагностики «скрытых» витковых замыканий в трёхфазных обмотках.

Для реализации этого выявлено, что основным параметром определяющим возможность использования электромагнитного индуктора для диагностики электрической машины является зубцовое деление ее магнитопровода, расстояние между его ножками и площадь соприкосновения этих ножек с магнитопроводом статора или ротора.

Для определения этих параметров предложен метод определения величины зубцового деления в зависимости от мощности электрической машины, напряжения и числа пар полюсов. Анализ результатов расчета величин зубцовых делений магнитопроводов статора и фазного ротора показал, что в интервале мощностей электрических машин 20-5000кВт его величина может принимать значения равные 0,01-0,038 метра.

На основе этого получены математические выражения позволяющие при принятых допущениях и минимальной величине зубцового деления равного 0,01 метра рассчитать расстояние между ножками электромагнитного индуктора и максимальную величину зубцового деления диагностика которого возможна с таким расстоянием между ножками этого индуктора. Установлено, что в соответствии с этими математическими выражениями расстояние между ножками электромагнитного индуктора должно равняться 0.016 метра, а максимальная величина зубцового деления диагностика которого возможна с таким расстоянием между ножками этого индуктора равняется 0,38 метра.

С учетом этих данных разработан электромагнитный индуктор, который позволяет менять конфигурацию магнитопровода и расстояние между ними. Что позволяет использовать его для диагностики трехфазных обмоток практически всех выпускаемых промышленностью электрических машин.

Кроме этого разработаны конструкции стационарного и передвижного кольцевого измерительного преобразователя, которые позволяют осуществить диагностику трехфазных обмоток практически всех выпускаемых промышленностью электрических машин не оснащенных таким преобразователем при их изготовлении.