

УДК 621.313.04

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. В. Семеренко, О. В. Луговая, А. А. Кушпиль

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: alexeysemerenko@ukr.net

Описана природа виткового короткого замыкания в обмотках электрических машин. Проведен анализ существующих методов контроля наличия короткозамкнутых витков и обоснован выбор индукционного метода, позволяющего с повышенной точностью определять наличие и число короткозамкнутых витков для основных видов электрических машин. На основе предложенного метода обоснована конструкция компьютеризированной системы для контроля короткозамкнутых витков в обмотках электрических машин при прогнозировании их реальных паспортных данных, рабочих характеристик и допустимых эксплуатационных параметров. Проведены экспериментальные исследования опытного образца компьютеризированной системы контроля, подтвердившие информативность и достоверность выбранного метода контроля.

Ключевые слова: индуктор, короткозамкнутый виток, система контроля.

РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ КОРОТКОЗАМКНЕНИХ ВИТКІВ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

О. В. Семеренко, О. В. Лугова, А. А. Кушпиль

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: alexeysemerenko@ukr.net

Описана природа виткового короткого замикання в обмотках електричних машин. Проведено аналіз існуючих методів контролю наявності короткозамкнених витків і обґрунтований вибір індукційного методу, що дозволяє з підвищеною точністю визначати наявність і кількість короткозамкнених витків для основних видів електричних машин. На основі запропонованого методу обґрунтовано конструкцію комп'ютеризованої системи для контролю короткозамкнених витків в обмотках електричних машин при прогнозуванні їх реальних паспортних даних, робочих характеристик і припустимих експлуатаційних параметрів. Проведено експериментальні дослідження дослідного зразка комп'ютеризованої системи контролю які підтвердили інформативність і достовірність обраного методу контролю.

Ключові слова: індуктор, короткозамкнений виток, система контролю.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Электрические машины (ЭМ), эксплуатируемые в настоящее время на предприятиях Украины, преимущественно характеризуются высокой степенью технического износа, что в свою очередь влияет на их надёжность. Одним из основных элементов ЭМ, определяющим её надёжность, является обмотка, качество которой зависит от свойств обмоточных проводов и изоляционных материалов, а также от совместимости обмоточных проводов и пропиточных составов.

С позиции надёжности асинхронных машин «слабым звеном» является обмотка статора. В подавляющем большинстве случаев (85–95 %) отказы двигателей мощностью свыше 5 кВт происходят из-за повреждения обмоток и распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93 %, пробой межфазной изоляции – 5 %, пробой пазовой изоляции – 2 % [1].

В синхронных машинах следует выделить обмотки статора и ротора. В них, вследствие дефектов изготовления, повреждений при монтаже или в процессе эксплуатации появляются участки с пониженной электрической прочностью изоляции [1].

На процесс разрушения изоляции ускоряющее влияние оказывают концентрации нагрузок: повышенные механические усилия при переходных процессах, перегрузки по току, перенапряжения, вибрации и др. В этой ситуации наличие участков с пониженной электрической прочностью приводит к

повреждению обмотки, т.к. амплитуды практически возможных перенапряжений недостаточны для пробоя доброкачественной изоляции.

Недостаточно надёжное крепление лобовых частей обмотки создает условие для повреждения изоляции преимущественно у выхода стержней из пазов. Со временем происходит опускание лобовых частей обмотки, в связи с чем появляются дополнительные напряжения, а лобовые части становятся более уязвимыми при вибрации и ударах под действием внезапных электродинамических усилий (короткие замыкания и несинхронные включения – для генераторов, пуски и реверсы – для двигателей). Серьезной опасности изоляция обмотки подвергается также при тепловых перегрузках, вызванных причинами местного характера. Так, при разрушении изоляции листов и местном замыкании сегментов активной стали температура в области замыкания может достигать 200–300 °С. Повреждению изоляции обмотки способствует также проникновение в машину воды и масла.

Повреждение обмотки ротора из-за ее перемещения при изменениях температуры является одной из основных причин аварий у турбогенераторов с принудительным охлаждением. Применение непосредственного охлаждения обмоток ротора и легированной (с присадкой серебра) меди позволяет существенно уменьшить температурные деформации обмотки: если для чистой меди марки М1 предел те-

кучести составляет 2000–3000 Н/см², то для легированной – 15000–20000 Н/см².

Применительно к машинам постоянного тока слабым местом является обмотка якоря. Число отказов электродвигателей по этой причине колеблется от 19,6 до 42 % в зависимости от отрасли промышленности и в среднем составляет 27,7 % [1]. Повреждение обмотки якоря происходит по следующим причинам: из-за пробоя корпусной изоляции между обмоткой и пакетом стали якоря, межвитковых замыканий (в якорях с многovitковыми секциями), распайки соединительных петушков коллекторных пластин с обмоткой (в машинах большой мощности), разрушения бандажей, удерживающих обмотку якоря (в высокоскоростных машинах) и др.

К общим причинам возникновения коротких замыканий в обмотках электрических машинах следует отнести: некачественную намотку, излишнее натяжение, "перехлесты" витков, повреждение изоляции провода вследствие сильного загрязнения, увлажнения или частичного разрушения в результате износа и т.п.

Металлические витковые замыкания являются одним из самых распространенных видов повреждения витковой изоляции обмоток. Короткие замыкания витков уменьшают активное сопротивление обмотки, что вызывает рост тока, изменение рабочих характеристик и номинальных паспортных данных электрических машин. Они не способны в полном объеме выполнять возложенные на них задачи или полностью выходят из строя. Таким образом, возникает необходимость контроля короткозамкнутых витков (КЗВ) в обмотках с целью прогнозирования возможности и эффективности использования электрических машин на прежнем месте работы.

Анализ предыдущих исследований. В настоящее время существуют два способа контроля обмоток на отсутствие короткозамкнутых витков по их входным сопротивлениям: путем сопоставления нагрузок импульсного генератора и по разбалансировке мостовой схемы.

В устройствах, основанных на первом способе, к источнику импульсного напряжения с помощью синхронного переключателя поочередно подключаются две или три фазы обмотки асинхронного двигателя. О дефекте в обмотках судят по раздвоению на экране осциллографа кривых напряжений на фазах обмотки. Построенные на данном способе устройства обладают низкой чувствительностью к короткозамкнутым виткам и, следовательно, низкой достоверностью контроля витковой изоляции, невозможностью автоматизации процесса отбраковки двигателей с короткозамкнутыми витками.

В устройствах для контроля обмоток трехфазных асинхронных двигателей, основанных на способе обнаружения КЗВ по разбалансировке мостовой схемы [2], в два плеча моста поочередно подключаются по две фазы обмотки, а в два других плеча – активные сопротивления или емкости одинаковой величины.

Контроль витковой изоляции обмоток асинхронных двигателей ведется в режиме резонанса напряжений.

Для сравнения чувствительности схем к наличию короткозамкнутых витков в обмотке одной из фаз асинхронного двигателя исследуется зависимость напряжения разбаланса мостовой схемы от частоты, и выделяются частоты, на которых эти напряжения достигают максимальных значений.

При контроле витковой изоляции фазы циклически меняются местами и производятся измерения напряжения разбаланса, из которых выбирается наибольшее. Предполагается, что фаза с КЗВ находится в одной из ветвей, образующих плечи моста.

Подключение в схему конденсаторов позволяет совместить испытания витковой и междупластинчатой изоляции с ее контролем на отсутствие металлических витковых замыканий.

По данным измерений напряжений для каждой схемы и статоров двигателей с одинаковым числом витков в фазе вычисляется коэффициент чувствительности k схемы к КЗВ как отношение наибольших напряжений при наличии и отсутствии КЗВ ($k = U_{max1}/U_{max2}$).

Для простых и часто встречающихся случаев нахождения коротких замыканий витков одной секции, между соседними коллекторными пластинами или же между соседними секциями, находящимися в одном слое обмотки, в практике нашел большое применение метод падения напряжения [3], который применяется как для петлевой, так и для волновой обмоток, и особенно удобен при исследовании якоря с уравнительными соединениями. Метод состоит в следующем.

К двум смежным коллекторным пластинам подводят постоянный ток при помощи пары щупов, второй парой щупов измеряют падение напряжения на этой же паре коллекторных пластин.

В случае петлевой обмотки при наличии замыкания в секции, присоединенной к исследуемой паре пластин, сопротивление ее будет меньше, и мы получим меньшее падение напряжения при одном и том же токе, чем на другой паре пластин, между которыми нет замыкания.

При простой волновой обмотке меньшее падение напряжения свидетельствует о наличии замыкания в секциях обхода обмотки, присоединенных к исследуемой паре пластин, поэтому в подобных случаях для нахождения секции, имеющей дефект, измеряют падение напряжения между коллекторными пластинами дефектного обхода, отстоящими друг от друга на шаг по коллектору.

Если шаг по коллектору неизвестен, то он может быть определен по наименьшему сопротивлению между двумя коллекторными пластинами, находящимися примерно на расстоянии двойного полюсного деления.

Указанным методом исследуется весь якорь, и производится сравнение результатов измерения по соответствующим парам пластин с одинаково изменяющимся падением напряжения. Преимуществом

метода является то, что он не требует использования специального оборудования, даёт хороший результат при небольшом числе витков в секции (стержневые обмотки).

Но в многовитковых проволочных секциях при замыкании 1–2 витков разница в показаниях милливольтметра на коллекторных пластинах исправной и поврежденной секций может оказаться незначительной.

Особого внимания в силу своей универсальности заслуживает индукционный метод, который может применяться для машин переменного и постоянного тока [4]. Кроме того, его преимуществом является более высокая чувствительность к меньшему числу короткозамкнутых витков по сравнению с другими методами. Поэтому в дальнейшем он и взят в основу исследований.

Цель работы – обоснование метода контроля КЗВ в обмотках электрических машин и разработка компьютеризированной системы контроля КЗВ на его основе.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Существующая в настоящее время аппаратура не позволяет достаточно надежно контролировать обмотки электрических машин на отсутствие в них витковых замыканий. Если число короткозамкнутых витков невелико, то их нельзя обнаружить измерением сопротивления на постоянном токе, так как такое замыкание мало отражается на значении сопротивления всей фазы, и его изменение может лежать в пределах допуска на отклонение сопротивления между фазами обмотки. Однако при включении двигателя под нагрузку короткозамкнутые витки будут вести себя как замкнутая накоротко вторичная обмотка трансформатора с малым сопротивлением. Вследствие относительно большого значения проходящего тока перегреваются материал обмотки и изоляция дефектных и прилегающих к нему витков.

Основным признаком, по которому можно найти замыкание в обмотках переменного тока, является нагрев короткозамкнутого контура. В некоторых случаях короткозамкнутую часть обмотки можно сразу определить по обуглившейся изоляции, но следует иметь в виду, что при наличии параллельных ветвей в обмотке короткое замыкание в одной из ветвей фазы может вызвать нагрев и другой ветви, не имеющей короткого замыкания, т.к. последняя оказывается замкнутой витками дефектной ветви обмотки.

Особенно сложен контроль обмоток асинхронных микроэлектродвигателей с тремя выводными концами, малые габаритные размеры которых не позволяют использовать индукционные методы обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках, а большое число витков в фазной обмотке приводит к малому влиянию виткового замыкания на входные сопротивления обмотки.

Короткие замыкания в обмотках можно классифицировать в зависимости от типа электрических машин, в которых они возникают.

Для машин постоянного тока возможны следующие случаи коротких замыканий в обмотке якоря: замыкание части витков одной секции; замыкание всей секции; замыкание между двумя секциями, лежащими в одном пазу; замыкание в лобовых частях обмотки; замыкание между любыми двумя точками обмотки, например в случае пробоя обмотки на корпус в двух точках.

Замыкание между смежными пластинами при петлевой обмотке вызывает замыкание секции, присоединенной к этим двум пластинам; замыкание же между двумя смежными пластинами при волновой обмотке вызывает замыкание секций, заключенных в одном полном обходе вокруг якоря. Число этих секций равно числу пар полюсов машины.

Замыкание между двумя секциями петлевой обмотки, лежащими в одном пазу в двух различных слоях обмотки, дает наибольшее число замыкаемых накоротко витков. В этом случае замыкаются накоротко все витки обмотки, находящиеся между двумя щетками различной полярности.

Для машин переменного тока возможны следующие случаи замыканий в обмотках (в статорных обмотках и роторных обмотках асинхронных двигателей): между витками одной катушки, между катушками или катушечными группами одной фазы, между катушками разных фаз.

Существующие системы контроля наличия КЗВ разрабатывались именно под эти типы машин, но они могут использоваться и для ЭМ других типов.

Индукционный метод основан на наличии электромагнитного поля вокруг короткозамкнутого витка, созданного в нем индуктированным током короткого замыкания. Поле вокруг остальных витков отсутствует. Наличие и положение короткозамкнутого витка обнаруживают особой катушкой, называемой искателем, к которой подключен чувствительный прибор. Принцип работы устройства поясняется на рис. 1.

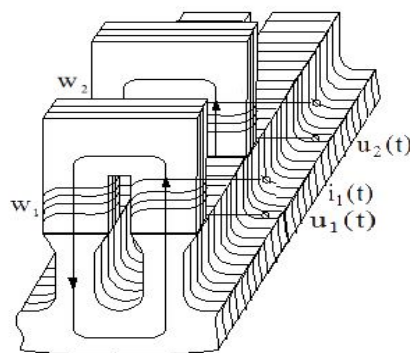


Рисунок 1 – К пояснению принципа работы устройства на основе индукционного метода поиска КЗВ

Измерительное устройство состоит из двух конструктивных частей – питателя и искателя. Они представляют собой магнитопроводы, состоящие из нескольких пластин электротехнической стали, на которые наносятся соответственно намагничивающая с числом витков w_1 и измерительная с чис-

лом витков w_2 обмотки. В дальнейшем обозначим эти устройства как намагничивающий индуктор (НИ) и измерительный индуктор (ИИ). НИ индуцирует магнитный поток в проверяемой обмотке. Перемещая индукторы сначала вдоль обмотки, а затем в радиальном направлении и оценивая среднее или среднеквадратическое значение напряжения $u_2(t)$ с ИИ, устанавливают место расположения пазов с короткозамкнутыми витками.

Действительно, наводимая в обмотке электродвижущая сила (ЭДС) [5] непосредственно связана с магнитным потоком Φ :

$$\Phi_t = \frac{E_1 \sqrt{2}}{\omega w_1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (1)$$

где Φ_t – мгновенное значение основного потока, E_1 – ЭДС, ω – круговая частота, w_1 – число витков намагничивающей обмотки, t – время.

При синусоидальном подведенном напряжении магнитный поток представляет собой синусоидальную функцию времени, причем поток опережает первичную ЭДС на угол $\pi/2$, т. е. на четверть периода, или, что одно и то же, первичная ЭДС отстает от потока на угол $\pi/2$.

Формулу можно представить в виде:

$$\Phi_t = \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (2)$$

где

$$\Phi_m = \frac{E_1 \sqrt{2}}{\omega w_1} = \frac{E_1 \sqrt{2}}{2\pi f w_1} = \frac{E_1}{\pi \sqrt{2} f w_1} \quad (3)$$

амплитуда магнитного потока. Отсюда действующее значение ЭДС

$$E_1 = \pi \sqrt{2} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (4)$$

Из этой формулы следует, что если частота f и число витков w_1 заданы, то $E_1 = C_e \Phi_m$, т. е. поток Φ_m прямо пропорционален ЭДС E_1 .

Вторичная обмотка пронизывается тем же потоком Φ_m . Поэтому действующее значение ЭДС вторичной обмотки выражается, по аналогии в виде:

$$E_2 = \pi \sqrt{2} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m, \quad (5)$$

где w_2 – число последовательно соединенных витков вторичной обмотки. По фазе ЭДС E_2 , так же как и ЭДС E_1 , отстает от потока Φ_m на угол $\frac{\pi}{2}$.

В общем случае $\Phi_t = -\int e_1 dt$, т. е. поток является интегральной функцией ЭДС. При несинусоидальной форме кривой ЭДС.

$$E_1 = 4k_e f w_1 \Phi_m, \quad (6)$$

где k_e – коэффициент формы кривой ЭДС. Следовательно

$$\Phi_m \equiv B_m \equiv \frac{E_1}{k_e} \equiv \frac{U_1}{k_e}. \quad (7)$$

С целью исследования и лабораторной апробации данного метода был изготовлен опытный образец описанного устройства, внешний вид которого показан на рис. 2.

Для определения дополнительных диагностических параметров и критериев, позволяющих оценить состояние обмотки, необходимо измерение мгновенных значений тока в намагничивающей обмотке $i_1(t)$ и напряжения $u_1(t)$ на ней, а также напряжения $u_2(t)$ на зажимах измерительной обмотки.

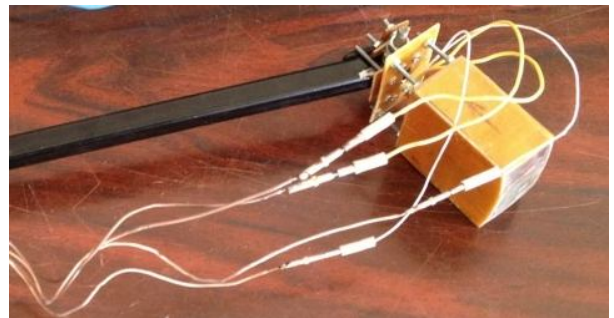


Рисунок 2 – Опытный образец устройства для обнаружения КЗВ

Для этого использовалась компьютеризированная система, структура которой представлена на рис. 3.

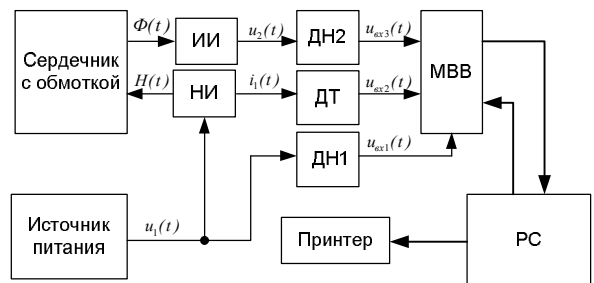


Рисунок 3 – Структура компьютеризированной системы контроля КЗВ

На рис. 3 используются следующие обозначения: ДН1, ДН2 – датчики напряжения; ДТ – датчик тока; МВВ – модуль аналого-цифрового ввода-вывода (в используемой системе – внешний измерительный USB-модуль типа E14-440D производства фирмы LCard). Повысить чувствительность системы контроля к минимальному числу КЗВ можно аппаратно-программным путем. Во-первых, НИ и ИИ должны быть спроектированы таким образом, чтобы исключить потерю чувствительности вследствие возможного насыщения их магнитных цепей в рабочем режиме. Это достигается путем правильного выбора электромагнитных нагрузок в соответствии с [5] и может быть оценено по форме комбинированной петли гистерезиса индукторов в рабочем режиме. Так, эллиптическая форма петли гистерезиса

для созданного опытного образца устройства для обнаружения КЗВ, представленная на рис. 4, подтверждает правильность его проектирования.

Во-вторых, необходимо учесть возможное влияние на точность измерений состояния шихтованных сердечников, что легко реализуется путем расчета потерь в стали в зоне установки индукторов. Для этого необходимо отделить от измеренных потерь потери в магнитопроводах индукторов, что возможно путем использования зависимости для полных или удельных потерь от магнитной индукции, аналогичной полученным для опытного образца устройства, представленной на рис. 5.

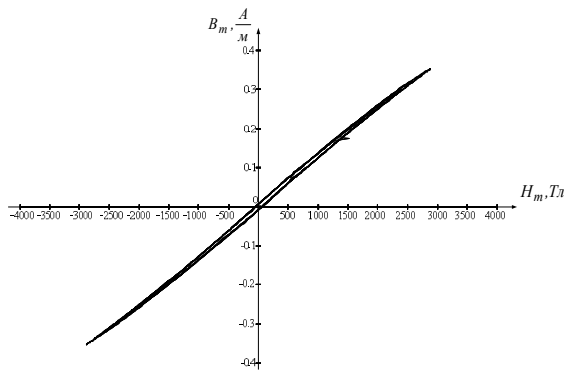


Рисунок 4 – Частная петля гистерезиса стали индукторов в рабочем режиме

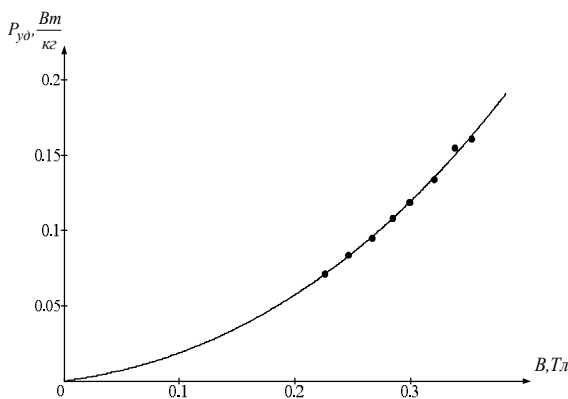


Рисунок 5 – Удельные потери в стали индукторов опытного образца

В-третьих, необходимо введение дополнительных контролируемых параметров, позволяющих детализировать информацию о степени повреждения, к которым могут быть отнесены значения составляющих сопротивлений эквивалентной электрической цепи индукторы – зубец, а также отдельные электрические и магнитные параметры. Для обоснованного их выбора необходимо провести полный спектр испытаний на разных видах сердечников при разных степенях повреждений обмотки.

Для этого было разработано программное обеспечение, реализующее уточненные математические методы расчета электрических цепей со сталью при различных формах изменения напряжения источника питания, построенные в соответствии с рекомендациями [5].

Данное программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме измерять мгновенные значения контролируемых величин, выводя их на экран вместе с действующим значением напряжения с ИИ, по величине которого судят о наличии КЗВ в существующих системах, а также сохранять результаты расчетов, включая мгновенные значения измеряемых величин и соответствующие им электрические и магнитные параметры. Для визуализации наличия КЗВ используется подход относительно цветного заполнения чекбукса в соответствии со значением напряжения с ИИ, т.е. о состоянии обмотке можно судить по степени заполнения и цвету, что облегчает работы по диагностике. На рис. 6–8 приведены результаты испытаний системы. Тестируемый сердечник на рис. 6 лишен обмотки, на рис. 7 имеет нормальную неповрежденную обмотку, на рис. 8 имеет повреждение одной из катушек рабочей группы.

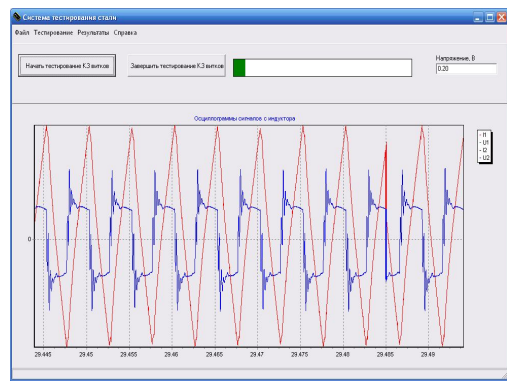


Рисунок 6 – Определение КЗ витков, статор без обмотки

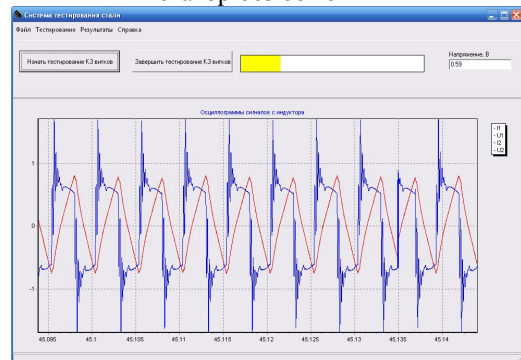


Рисунок 7 – Определение КЗ витков, статор с нормальной обмоткой



Рисунок 8 – Определение КЗ витков, статор из поврежденной обмоткой

Как видно из рис. 6–8, наличие КЗВ приводит к изменению величины напряжения с ИИ, тока в обмотке НИ и их формы, что может использоваться в дальнейшем для обоснования выбора контролируемых параметров, а также улучшения точности и чувствительности предложенного метода и системы.

ВЫВОДЫ.

1. В результате анализа особенностей виткового короткого замыкания в обмотках электрических машин разных видов и существующих методов и устройств их контроля обоснована эффективность использования индукционного метода, как наиболее чувствительного и универсального в плане определения как самого факта, так и степени повреждения обмотки

2. На основе сформулированных требований к первичным измерительным устройствам и обоснованной структуры разработана компьютеризированная система контроля КЗВ, включая ее прикладное программное обеспечения, позволяющие автоматизировать и визуализировать процесс обнаружения КЗВ для облегчения работы оператора.

3. Обоснованы перспективы повышения точности и достоверности используемого метода путем правильного проектирования измерительных устройств, учета свойств магнитных материалов и использования новых контролируемых параметров.

4. Информация о состоянии обмоток, полученная при их контроле посредством разработанной системы, будет положена в основу уточненных методов определения реальных паспортных данных, рабочих характеристик и допустимых эксплуатационных параметров электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
2. Горбунов Ю.К., Гуков В.И., Тихобаев В.Г. и др. Схемы обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках асинхронных двигателей с тремя выводными концами // *Электротехника*. – 1989. – № 3. – С. 24–28.
3. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – М.: «Энергоатомиздат», 1989. – 333 с.
4. Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: учебник для вузов – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.
5. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. – Л.: «Энергия», 1972. – 543 с.

DEVELOPMENT OF THE COMPUTERIZED SYSTEM OF SHORT-CIRCUITED TURNS MONITORING IN ELECTRIC MACHINES WINDINGS

O. Semerenko, O. Lugova, A. Kushpil

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: alexeysemренко@ukr.net

The nature of the short-circuit turns in electric machines windings has been described. The analysis of existing methods of detecting short-circuited turns has been carried out. The choice of induction method enabling improved detection and determination of the number of short-circuited turns for all types of electric machines has been substantiated. A design of a computerized system for detection of short-circuited turns in electric machines windings has been grounded on the basis of the proposed method, and the possibility of forecasting the electric machine real published data, working characteristics and admissible operating parameters has been provided. The information value and reliability of the chosen method of control have been confirmed by experimental research of the prototype model of the computerized monitoring system.

Key words: inductor, short-circuited turn coil, control system.

REFERENCES

1. Kotelenets, N.F., Kuznetsov, N.L. (1988), *Ispytaniya i nadezhnost elektricheskikh mashin* [Testing and reliability of electric machines], Textbook, Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
2. Gorbunov, Y.K., Gukov, V.I., Tikhobayev, V.G., Kriukov, S.I., Levin, B.M., Sokolov, I.Y. (1989), “Detection schemes of short-turns in the windings of asynchronous motors with three leads”, *Power Engineering*, no. 3, pp. 24
3. Gemke, R.G. (1989), *Neispravnosti elektricheskikh mashin* [Failures of electric machines], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
4. Kotelenets, N.F., Akimova, N.A., Antonov, M.V. (2003), *Ispytaniya, ekspluatatsiya i remont elektricheskikh mashin* [Testing, maintenance and repair of electrical machinery], Textbook for higher schools, Publishing Center "Academy", Moscow, Russia.
5. Kostenko, M.P., Piotrowski, L.M. (1972), *Elektricheskie mashiny. Chast 1. Mashiny postoyannogo toka. Transformatory* [Electric machines. Part 1. DC machines. Transformers], Energiya, St.-Petersburg, Russia.

Стаття надійшла 18.12.2013.