

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

Анализ состояния электрических машин путём измерения межвиткового сопротивления в его обмотках

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, К.А. Любинский, А.И. Голубович

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 07.04.2023

Принята к печати 29.05.2023

Применяемые в промышленности методы диагностики не позволяют проконтролировать состояние обмоток электрических машин в рабочем состоянии и зафиксировать дефектообразование в них на ранних стадиях развития. Целью работы являлась разработка метода и построение прибора, позволяющего проводить измерение межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, в том числе без изъятия его из технологического процесса, и тем самым проводить оценку текущей и дальнейшей работоспособности.

Разработана структурная схема прибора для измерения межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, описан метод и построен алгоритм проведения диагностических процедур. Также в результате исследования определены математические зависимости, характеризующие основные операции, выполняемые устройством, и разработана математическая модель получения значения межвиткового сопротивления в диагностируемых обмотках по значению измеренной разности фаз для асинхронного двигателя АИР63В4У3.

Разработанный метод и прибор на его основе позволяют проводить измерение межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, в том числе без изъятия его из технологического процесса, и фиксировать дефектообразование на ранних стадиях развития, и тем самым оценивать в режиме реального времени его текущую и дальнейшую работоспособность.

Ключевые слова: диагностика обмоток электрических машин, межвитковое сопротивление, способ измерения межвитковых сопротивлений в обмотках, прибор для измерения межвитковых сопротивлений

Адрес для переписки:

Исаев А.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: isaevav@bntu.by

Address for correspondence:

Isaev A.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosti Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: isaevav@bntu.by

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, К.А. Любинский, А.И. Голубович.
Анализ состояния электрических машин путём измерения
межвиткового сопротивления в его обмотках.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 126–134.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

For citation:

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, K.A. Lyubinsky, A.I. Golubovich.
[Analysis of Electrical Machines' State by Measuring
the Interturn Resistance in Its Windings].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 2, pp. 126–134 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

Analysis of Electrical Machines' State by Measuring the Interturn Resistance in Its Windings

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, K.A. Lyubinsky, A.I. Golubovich

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosti Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 07.04.2023

Accepted for publication 29.05.2023

Abstract

Diagnostic methods applied in the industry do not allow to control the state of electrical machines windings in working condition and to fix the defect formation in them at the early stages of development. The aim of the work was to develop a method and construct a device that allows measuring interturn resistances in the electrical machines' windings without the need to remove it from the technological process, and thereby assess its current and future performance.

A block diagram of a device for measuring of interturn resistances in the electrical machines' windings has been developed, a method has been described, and an algorithm for carrying out diagnostic procedures has been developed. Also, as a result of the study, mathematical dependencies were determined that characterize the main operations performed by the device and a mathematical model was developed for obtaining of the interturn resistance value in the diagnosed windings from the value of the measured phase difference for the AIR63V4U3 asynchronous motor.

The developed method and a device based on it allow measuring interturn resistances in the electrical machines' windings without the need to remove it from the technological process and fix the beginning of defect formation, and, thereby, evaluate its current and future performance in real time.

Keywords: diagnostics of windings of electrical machines, interturn resistance, method for measuring interturn resistance in windings, device for measuring interturn resistance

Адрес для переписки:

Исаев А.В.

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: isaevav@bntu.by

Address for correspondence:

Isaev A.V.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosti Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: isaevav@bntu.by

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, К.А. Любинский, А.И. Голубович.
Анализ состояния электрических машин путём измерения
межвиткового сопротивления в его обмотках.

Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 126–134.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

For citation:

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, K.A. Lyubinsky, A.I. Golubovich.
[Analysis of Electrical Machines' State by Measuring
the Interturn Resistance in Its Windings].
Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 126–134 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

Введение

Современное развитие электроники в области приборо- и станкостроения привело к необходимости разработки качественной и своевременной диагностики состояния электрических машин. При этом наиболее существенная проблема состоит в диагностике состояния обмоток статора, на неисправность которых может выпадать до 80 % от всех причин, определяющих их работоспособность [1, 2, 3].

Однако существующие методы диагностики электрических машин чаще всего только констатируют факт выхода её из строя и не позволяют хотя бы в минимальных пределах определять дальнейшую жизнеспособность и остаточный ресурс диагностируемого оборудования [4]. Дополнительно представленные в промышленности методы контроля и диагностики состояния электрических машин имеют ряд особенностей, которые ещё больше ограничивают сферу их применения. А именно: применение сложного диагностического оборудования и алгоритмов исследования состояния требует высокой квалификации обслуживающего персонала и больших временных затрат на организацию диагностических процедур. Следовательно, такие методы контроля состояния электрических машин малоприменимы в современных реалиях и совсем не подходят для контроля их состояния в режиме реального времени, в том числе непосредственно в рабочем режиме технологического процесса.

Математические модели, построенные на основе статистических данных по выходу из строя электрических машин [5], также не дают никакой гарантии о своевременном обнаружении развивающихся дефектов и, следовательно, мало применимы в реальных условиях работы технологического оборудования. Поэтому, максимально актуальной является разработка метода и построение системы, позволяющих в режиме реального времени отслеживать состояние диагностируемой электрической машины с оценкой не только текущего состояния, но и фиксировать начало дефектообразования и прогнозировать её дальнейшую работоспособность [1, 3]. Одним из таких способов может являться контроль и измерение сопротивления межвитковой

изоляции в обмотках диагностируемой электрической машины.

Согласно [6] электрическую машину можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, состоящей из набора активных и реактивных элементов, организующих электромагнитный контур и обладающих резонансными явлениями на определённых частотах. Следовательно, контролируя уровень резонансных явлений, протекающих в двух сравниваемых обмотках одной электрической машины (например, путём вычитания результирующих сигналов каждой обмотки), можно на достаточно высоком уровне судить о состоянии самих обмоток.

В настоящее время такой подход к контролю состояния обмоток электрических машин (ЭМ) реализуется в нескольких направлениях, которые условно можно разделить на два, основами которых являются типы используемого диагностического сигнала: гармонический или импульсный.

Так, представлены способы, где в качестве диагностического сигнала используются синусоидальные сигналы, которые по соответствующей схеме подаются на обмотки контролируемой ЭМ. Например, способ комплексного контроля фазных обмоток ЭМ [7, 8], при котором подают основное и дополнительное напряжение на фазные обмотки контролируемой электрической машины, снимают напряжение с выводов фазных обмоток, измеряют параметр снимаемых напряжений, находят их частотный максимум, и, проведя несколько контрольных операций, определяют дефект по превышению величины измеренного параметра над установленной величиной для исправной обмотки. Этот способ обладает рядом недостатков: ограниченная область применения, так как невозможно провести контроль электрических машин с внутренним соединением фаз обмоток в звезду и без наличия четвёртого (нулевого) вывода; форма высокого напряжения, подаваемого на обмотки электрической машины, существенно отличается от синусоидального, что приводит к большой погрешности результатов диагностики.

Известны способы комплексного контроля фазных обмоток трёхфазной ЭМ [9, 10], при которых в качестве параметра снимаемых напряжений измеряют абсолютное значение

разности фаз напряжений, дополнительное напряжение подают после основного с частотой, составляющей 90 % от частоты максимума абсолютного значения измеренной разности фаз, величиной выше, чем основное напряжение и достаточной для достоверного заключения о бездефектности витковой изоляции. Основной недостаток – малая достоверность контроля из-за одновременного использования двух источников напряжения (основного и дополнительного), обладающих различием в частотных характеристиках и внутренних сопротивлениях, вызванных несовпадением параметров реализованных блоков.

В определённой мере эти недостатки компенсируются применением в качестве диагностических сигналов импульсных последовательностей. Например, известен способ комплексного контроля трёхфазной обмотки ЭМ, основанный на подаче последовательностей из разнополярных [11] и однополярных [12] импульсов напряжения в виде групп на выводы обмотки, две фазы которой включают как плечи измерительного активно-индуктивного моста. При этом, путём изменения длительности импульсов и времени задержки между ними в создаваемой последовательности, совмещают участок её спектра с низкочастотным участком частотной характеристики обмотки и определяют наличие замыкания по величине разности фаз гармоник, выделенных из сигналов, снятых с плеч моста. Однако, этим способом присущи свои недостатки: высокая погрешность (из-за использования двух избирательных блоков, обладающих различием в частотных характеристиках и внутренних сопротивлениях, вызванных различием параметров каскадов на основе операционных усилителей, на которых реализованы эти избирательные устройства; использование разнополярных импульсов приводит к дополнительной погрешности из-за их неизбежной асимметрии импульсов и разброса параметров и дополнительно ограничивает возможность цифровой реализации измерительного процесса); низкая помехозащищённость из-за трудности выделения необходимой спектральной составляющей при наличии близко лежащих соседних спектральных составляющих и низкая чувствительность к влиянию межвитковых замыканий на выделяемые для анализа сигнал, так как

анализ параметров спектра выполняется на дорезонансных частотах, что в свою очередь приводит к повышенному влиянию помех.

Целью данной работы являлась разработка метода и построение прибора, позволяющего проводить измерение межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, в том числе без необходимости удаления его из технологического процесса, и тем самым проводить оценку его текущей и дальнейшей работоспособности путем фиксирования начала дефектообразования в них.

Основная часть

Одним из способов решения задачи по созданию системы измерения межвитковых сопротивлений в обмотках ЭМ является объединение достоинств представленных методов с максимальным исключением недостатков, присущих им. Для этого в качестве испытательного сигнала используем импульсную последовательность, временные параметры которой будут определять параметры спектральных составляющих, необходимых для выполнения диагностических процедур. Кроме этого, дополнительно уменьшим погрешности, присущие подобным методам контроля, путём использования в цепи анализа информативного сигнала только одного избирательного блока. По результатам исследования разработано устройство для измерения межвитковых сопротивлений в обмотках трёхфазных асинхронных электрических двигателях со всыпной обмоткой, структурная схема которого представлена на рисунке 1.

Система для измерения межвитковых сопротивлений в обмотках электродвигателей работает следующим образом. К одной из обмоток ЭМ 1 с помощью блока переключателей (коммутаторов) 2 подключают систему формирования испытательного сигнала 3, являющегося частью микропроцессорного устройства и преобразованного в блоке усиления 4. При этом выходы оставшихся двух других обмоток подключают к измерительным резисторам 5 и 6, сигнал с которых подают на смеситель сигналов 7. Полученный результирующий сигнал подают на вход избирательного устройства суммы снимаемых сигналов 8, выход которого подключают к одному из

измерительных входов измерительной части микропроцессорного устройства 10. На второй вход измерительной системы подключают выход избирательного устройства испытательного сигнала 9, вход которого, в свою очередь, подключают к выходу системы формирования исходного испытательного сигнала. Также в системе реализован блок индикации 11, отображающий текущее состояние работы устройства и результаты диагностики электрической машины.

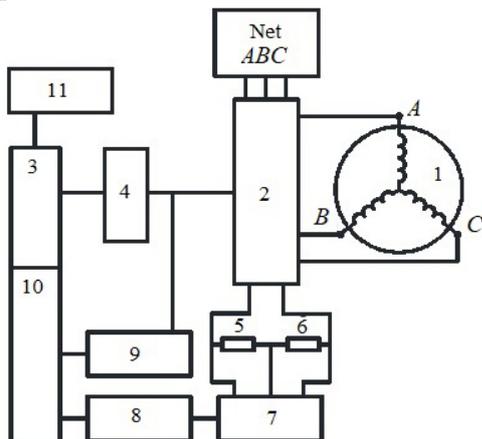


Рисунок 1 – Структурная схема устройства измерения межвитковых сопротивлений в обмотках трёхфазных электрических двигателей

Figure 1 – Structural scheme of the system for measuring of interturn resistance in the windings of three-phase electric motors

Работа устройства заключается в следующем. Генератор испытательного напряжения, реализованный на микропроцессорном устройстве, формирует последовательность групп импульсов положительной полярности с устанавливаемыми параметрами длительности импульсов t_i и временами задержки между ними t_{z1} , t_{z2} , t_{z3} и т.д., (рисунок 2) [13].

Для этого выбираются длительности импульсов и времена задержки таким образом, чтобы выполнялось следующее условие: $n_{0_{t_i}} = N \cdot T / t_i$ для самой дальней спектральной составляющей, имеющей максимальный спектр относительно выделяемой, и подавляемая длительностью первого импульса (рисунок 3 кривая 1).

После формирования первого импульса через время, определяемое условием:

$$n_{0_{t_{z1}}} = N \cdot T / 2t_{z1}$$

формируется второй импульс, идентичный первому, для самой дальней спектральной составляющей, имеющий минимальный спектр относительно выделяемой (рисунок 3 кривая 2).

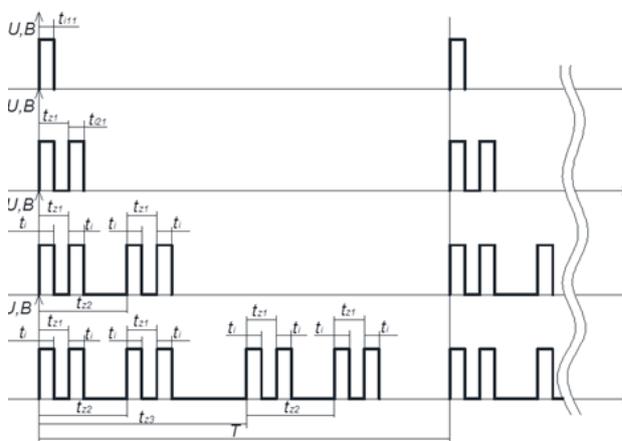


Рисунок 2 – Построение импульсной последовательности для выделения информативной спектральной составляющей

Figure 2 – Construction of a pulse sequence to highlight the informative spectral component

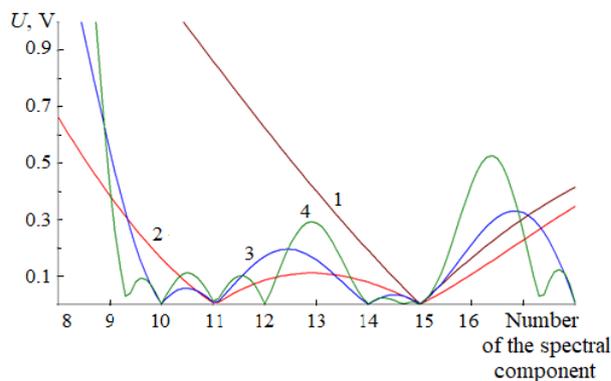


Рисунок 3 – Амплитудно-частотные спектры сигналов при формировании испытательной импульсной последовательности: 1 – для одиночного импульса; 2 – двух повторяющихся импульсов; 3 – комбинации двух двойных повторяющихся импульсов; 4 – результирующего сигнала из восьми импульсов

Figure 3 – Amplitude-frequency spectra of signals in the formation of the test pulse sequence: 1 – for single pulse; 2 – two repetitive pulses; 3 – combinations of two double repetitive pulses; 4 – the resulting signal of eight pulses

Далее, для подавления следующей спектральной составляющей, формируется импульсная группа из двух импульсов, которую повторяют через время задержки, для

$n_{0z1} = N \cdot T / 2t_{z1}$ которой выполняется условие для спектральной составляющей, расположенной между выделяемой и предыдущей подавленной составляющей с максимальным номером спектра (рисунок 3 кривая 3).

Следующая спектральная составляющая подавляется путём формирования следующей импульсной группы из четырёх импульсов, которую повторяют через очередное время задержки, уже определяющее ноль спектральной составляющей, расположенной между выделяемой и предыдущей подавленной с минимальным номером спектра (рисунок 3 кривая 4).

В результате этих действий компоненты указанных спектров принимают значения нуля, при этом для остальных компонент их амплитуды в результирующем испытательном сигнале (u_{gn}) можно представить в виде уравнения (1) и влияние искажений от помех на полезный сигнал будет минимально:

$$u_{gn} = U_{gn} \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где U_{gn} – значение амплитуды сигнала генератора при выделении в нём составляющей спектра, содержащего полезную информацию; n – значение номера каждой спектральной

$$\begin{aligned} \dot{A}_{\text{inf}} &= \dot{A}_{\text{inf}1} + \dot{A}_{\text{inf}2} = \\ &= (U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + jU_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}}) + (U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}} + jU_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}) = \\ &= (U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}}) + j(U_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}) = \\ &= \sqrt{(U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}})^2 + (U_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}})^2} \times e^{\arctg \frac{U_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}}{U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Откуда амплитуда результирующего сигнала определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} &= \sqrt{(U_{m1\text{inf}}^2 + U_{m2\text{inf}}^2 + 2U_{m1\text{inf}}U_{m2\text{inf}}(\cos \psi_{1\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}} + \sin \psi_{1\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}))} = \\ &= \sqrt{(U_{m1\text{inf}}^2 + U_{m2\text{inf}}^2 + 2U_{m1\text{inf}}U_{m2\text{inf}} \cos(\psi_{1\text{inf}} - \psi_{2\text{inf}}))}. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим фазу полученного сигнала. Учитывая, что амплитуда сигналов, полученных с двух плеч, не существенно зависит от уровня

составляющей, которая содержит полезную информацию; ω – значение частоты, создаваемой генератором сигнала; φ_n – значение фазы сигнала генератора при выделении в нём составляющей спектра, содержащего полезную информацию.

Например, на обмотку A электрической машины 1 подадим последовательность импульсов, которую мы получили. Вместе с этим с обмоток B и C будем снимать с помощью резисторов 3, 4 сигналы (уравнения 2, 3):

$$\begin{aligned} a_1(t) &= \sum_{n=1}^k U_{mn1} \sin(n\omega t + \psi_{n1}); \\ a_2(t) &= \sum_{n=1}^k U_{mn2} \sin(n\omega t + \psi_{n2}) \end{aligned} \quad (2)$$

или в векторной форме:

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 &= \sum_{n=1}^k (U_{mn1} \cos \psi_{n1} + jU_{mn1} \sin \psi_{n1}); \\ \dot{A}_2 &= \sum_{n=1}^k (U_{mn2} \cos \psi_{n2} + jU_{mn2} \sin \psi_{n2}). \end{aligned} \quad (3)$$

Далее полученный комплекс спектральных составляющих суммируется в смесителе 5. Из полученной комбинации, содержащей набор спектральных составляющих, каждая из которых имеет свой сдвиг фаз, с помощью избирательного устройства 6 выделяют одну информативную спектральную составляющую, уравнение которой имеет вид:

$$\dot{A}_{\text{inf}} = \dot{A}_{\text{inf}1} + \dot{A}_{\text{inf}2} = (U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + jU_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}}) + (U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}} + jU_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}) = (U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}}) + j(U_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}) = \sqrt{(U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}})^2 + (U_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}})^2} \times e^{\arctg \frac{U_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}}{U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}}}}. \quad (4)$$

Откуда амплитуда результирующего сигнала определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} &= \sqrt{(U_{m1\text{inf}}^2 + U_{m2\text{inf}}^2 + 2U_{m1\text{inf}}U_{m2\text{inf}}(\cos \psi_{1\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}} + \sin \psi_{1\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}))} = \\ &= \sqrt{(U_{m1\text{inf}}^2 + U_{m2\text{inf}}^2 + 2U_{m1\text{inf}}U_{m2\text{inf}} \cos(\psi_{1\text{inf}} - \psi_{2\text{inf}}))}. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим фазу полученного сигнала. Учитывая, что амплитуда сигналов, полученных с двух плеч, не существенно зависит от уровня

дефекта обмотки, можно сделать допущение:

$$U_{m1\text{inf}} = U_{m2\text{inf}} = U_{\text{minf}}. \quad (6)$$

Следовательно, фаза результирующего сигнала:

$$\begin{aligned} \frac{U_{m1\text{inf}} \sin \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \sin \psi_{2\text{inf}}}{U_{m1\text{inf}} \cos \psi_{1\text{inf}} + U_{m2\text{inf}} \cos \psi_{2\text{inf}}} &= \frac{U_{\text{minf}} (\sin \psi_{1\text{inf}} + \sin \psi_{2\text{inf}})}{U_{\text{minf}} (\cos \psi_{1\text{inf}} + \cos \psi_{2\text{inf}})} = \frac{\sin \psi_{1\text{inf}} + \sin \psi_{2\text{inf}}}{\cos \psi_{1\text{inf}} + \cos \psi_{2\text{inf}}} = \\ &= \frac{2 \sin \frac{\psi_{1\text{inf}} + \psi_{2\text{inf}}}{2}}{2 \cos \frac{\psi_{1\text{inf}} + \psi_{2\text{inf}}}{2}} = \text{tg} \frac{\psi_{1\text{inf}} + \psi_{2\text{inf}}}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Или полное уравнение информативной спектральной составляющей имеет вид:

$$\dot{A}_{\text{inf}} = \sqrt{U_{m1\text{inf}}^2 + U_{m2\text{inf}}^2 + 2U_{m1\text{inf}}U_{m2\text{inf}}(\cos(\psi_{1\text{inf}} - \psi_{2\text{inf}}) \cdot e^{\frac{\psi_{1\text{inf}} + \psi_{2\text{inf}}}{2}})}, \quad (8)$$

где:

$$\psi_{1\text{inf}} = \psi_g + \Delta\varphi_1 \quad \text{и} \quad \psi_{2\text{inf}} = \psi_g + \Delta\varphi_2, \quad (9)$$

где φ_n – фаза необходимой спектральной составляющей подаваемого с генератора напряжения; $\Delta\varphi_{n1}$ – изменение фазы исследуемой спектральной составляющей, определяемой добротностью контура катушки первой обмотки; $\Delta\varphi_{n2}$ – изменение фазы исследуемой спектральной составляющей, определяемой добротностью контура катушки второй обмотки.

Полученный сигнал подают на фазовый детектор 8, на второй вход которого подают выделенную на избирательном устройстве 7 информативную спектральную составляющую сигнала, формируемую генератором испытательного сигнала 2. В результате величина разности фаз определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \psi_g - \frac{\psi_{1\text{inf}} + \psi_{2\text{inf}}}{2} = \\ &= \psi_g - \frac{\psi_g + \Delta\varphi_1 + \psi_g + \Delta\varphi_2}{2} = \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Величина разности фаз коррелирована с сопротивлением в месте дефекта витковой изоляции и связана зависимостью:

$$R_i(\Delta\varphi) = a_{1i} \cdot \Delta\varphi^0 + a_{2i} \cdot \Delta\varphi^{1/2} + a_{3i} \cdot \Delta\varphi^1 + a_{4i} \cdot \Delta\varphi^{3/2} + a_{5i} \cdot \Delta\varphi^{5/2}, \quad (11)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – начальные значения коэффициентов, зависящие от типа выбранной электрической машины; i – тип выбранной электрической машины; $\Delta\varphi$ – разность фаз, полученная на фазовом детекторе.

Для полной диагностики состояния обмоток электрической машины с помощью блока переключателей 2 в измерительной системе меняют местами выводы для подключения к генератору испытательного напряжения и одного из выводов двух других обмоток (например, выводы A и B).

Для наглядности исследуем дефект изоляции в обмотках статора трёхфазного асинхронного двигателя со всыпной обмоткой с напряжением питания 380 В и мощностью 380 Вт АИР63В4У30, определив в них место и уровень дефектного межвиткового

сопротивления. Резонанс обмотки данного двигателя находится в области 45 кГц. Для этого с помощью генератора испытательного напряжения, реализуемого на основе программируемого микроконтроллера *STM32F103C8TB6c* и усилителя мощности, построенного на *MOSFET*-транзисторе *IRF740*, организуем импульсную последовательность, где, задавая временные параметры этой последовательности, выделим 13-ю спектральную составляющую, максимально подавив расположенные рядом (т. е. 11-ю, 12-ю, 14-ю и 15-ю спектральные составляющие). В результате получим импульсную последовательность с периодом T , равным 23 мксек.

Далее, согласно выражениям

$$n_{0i} = N \cdot \frac{T}{t_i} \quad \text{и} \quad n_{0z1} = N \cdot \frac{T}{2t_{z1}},$$

в формируемой импульсной последовательности определим длительность импульса и задержку между импульсами. Таким образом, имеем следующие значения:

$$t_i = N \frac{T}{n_{0i}} = 1.3 \text{ мксек};$$

$$t_{z1} = N \frac{T}{2n_{0z1}} = 1.8 \text{ мксек};$$

$$t_{z2} = N \frac{T}{2n_{0z2}} = 3.5 \text{ мксек};$$

$$t_{z3} = N \frac{T}{2n_{0z3}} = 7.2 \text{ мксек}.$$

На вывод A фазной обмотки исследуемого асинхронного двигателя подаём сформированный импульсный сигнал, а с выводов B и C с помощью измерительных резисторов снимаем результирующие выходные сигналы. Затем, полученные с двух плеч измерительной системы сигналы складываются в суммирующем устройстве, построенном на интегральном двухвентильном операционном усилителе ОРА2237. Результирующий сигнал сумматора, представляющий собой комплекс спектральных составляющих с индивидуальными параметрами, подаётся на избирательное устройство, реализованное на прецизионном

операционном усилителе AD8551ARZ и настроенное на информативную спектральную составляющую. Здесь выделяется сигнал (спектральная составляющая) частотой 44,5 кГц, который подаётся на один из измерительных входов микропроцессорного устройства, где по относительному смещению фазы относительно базового сигнала, подаваемого на второй измерительный вход микропроцессорного устройства, на основании зависимости $\Delta\varphi = f(R)$, определённой для данного типа двигателя и в соответствии с уравнением (11) и коэффициентами для этого двигателя, полученными ранее, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , выявляется обмотка диагностируемого электродвигателя с дефектом изоляции и определяется значение межвиткового сопротивления, информация о чём транслируется на индикаторе. На рисунке 4 в точке А видно, что значение $\Delta\varphi$ при такой схеме подключения (рисунок 1) составляет 27° , а сопротивление в обмотке с дефектом будет на уровне 10^5 Ом.

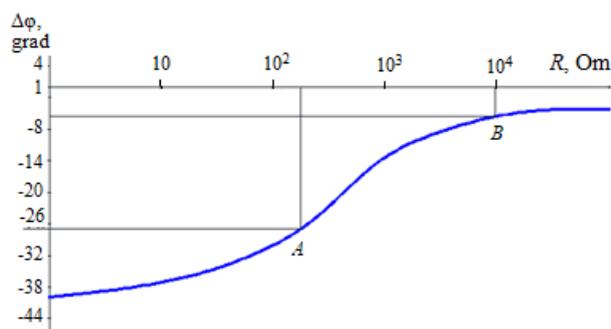


Рисунок 4 – Определение межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин по измененному значению разности фаз

Figure 4 – Detection of interturn resistance in the electrical machines' windings by the measured value of the phase difference

Изменив схему подключения двигателя, а именно поменяв контакты А и В местами и повторно измерив выходные сигналы, получим значения $\Delta\varphi = 7^\circ$ и $R \approx 10$ кОм (рисунок 4 точка В). Сравнив значения сопротивлений в двух случаях измерения, можно сделать заключение, что в диагностируемом асинхронном электродвигателе присутствует дефектная фазная обмотка, а, следовательно, он неисправен и не способен работать в номинальном режиме. Причиной неисправности является прогрессирующий дефект изоляции в обмотке с выводом В и двигателю необходим ремонт.

Заключение

Представлен принцип функционирования устройства по измерению ослабленного межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин как устройства анализа его работоспособного состояния.

Разработан прибор, позволяющий по фазовым соотношениям сигналов, полученных с двух фаз, включённых как плечи измерительного активно-индуктивного моста формируемого обмотками ЭМ, с высокой точностью измерять минимальные значения межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, что, в свою очередь, позволит фиксировать дефектообразование в них на ранних стадиях развития.

Представленный прибор может служить основой для построения автоматизированных контрольно-диагностических систем для проверки состояния обмоток электрических машин.

Список использованных источников

1. Иванов В.Н. Анализ надёжности тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах восточного региона, статьи технической тематики из периодических изданий, Регионального Центра Инновационных Технологий, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rcit.su/article080.html>

2. Gritli Y., Filippetti F., Casadei D. Diagnosis and Fault Detection in Electrical Machines and Drives based on Advanced Signal Processing Techniques. Department of Electrical, Electronic, and Information Engineering “Guglielmo Marconi”, Ph.D. in Electrical Engineering XXVI Cycle Power Electronics, Electrical Machines and Drives (ING-IND/32), 2014, 131 p.

3. Nuriddinov S., Avazov B., Hasanov F., Rakhmonova Y. Analysis of the causes of traction electric failures of electric cargo cars operated on railways of the Republic of Uzbekistan. E3S Web of Conferences, 2021, vol. 264, p. 05041.

DOI: 10.1051/e3sconf/202126405041

4. Волчихин В.И. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / В.И. Волчихин. – Воронеж: Кварта. – 2004. – 312 с.

5. Гутов И.А. Математические модели для прогнозирования технического состояния изоляции электрооборудования. / И.А. Гутов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4.

6. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. 8-е изд., испр. и доп. – Л.: Энергия, 1995. – 296 с.

7. Патент ВУ20042. Способ комплексного контроля трехфазной электрической машины / Ю.В. Суходолов, А.В. Белоусов, Л.П. Крученюк; заявл. 11.01.2012.

8. Patent WO2014136052A1. Raúl Esteban, Jimenez Mejia, Guillermo León, Mesa Betancur. Method and system for the detection and diagnosis of faults in electric machines when in operation; 12.09.2014.

9. Патент RU2529596. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя // И.Ф. Суворов, Р.В. Горбунов, Г.А. Палкин; заявл. 27.09.2014.

10. Патент RU2213270. Способ диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока / Ю.Л. Жуковский, С.И. Таранов; заявл. 10.11.2014.

11. Патент RU2289143C2. Способ комплексного контроля трехфазной обмотки электрической машины / С.А. Сильвашко, В.Н. Булатов, В.Д. Шевеленко; заявл. 10.12.2006.

12. Патент RU2339962. Способ контроля трехфазной обмотки электрической машины / В.Н. Булатов, С.А. Сильвашко, 2011.

13. 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.

References

1. Ivanov V.N. *Analiz nadozhnosti tyagovykh elektricheskikh mashin elektrovozov, ekspluatiruyemykh na zheleznykh dorogakh vostochnogo regiona* [Analysis of the reliability of traction electric machines of electric locomotives operated on the railways of the eastern region]. Technical articles from periodicals Regional Center for Innovative Technologies. [Electronic Resource]. Available at: <https://rcit.su/article080.html>

2. Gritli Y., Filippetti F., Casadei D. Diagnosis and Fault Detection in Electrical Machines and Drives based on Advanced Signal Processing Techniques. Department of Electrical, Electronic, and Information Engineering “Guglielmo Marconi”, Ph.D. in Electrical Engineering XXVI Cycle Power Electronics, Electrical Machines and Drives (ING-IND/32), 2014, 131 p.

3. Nuriddinov S., Avazov B., Hasanov F., Rakhmonova Y. Analysis of the causes of traction electric failures of electric cargo cars operated on railways of the Republic of Uzbekistan. E3S Web of Conferences,

2021, vol. 264, p. 05041.

DOI: 10.1051/e3sconf/202126405041

4. Volchikhin V.I. *Ispytaniya, ekspluatatsiya i remont elektricheskikh mashin* [Testing, operation and repair of electrical machines]. Voronezh: Quarta Publ., 2004, 312 p.

5. Gutov I.A. *Matematicheskiye modeli dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya izolyatsii elektrooborudovaniya* [Mathematical models for predicting the technical condition of electrical equipment insulation], *Polzunovskiy Vestnik*, 2009, no. 4.

6. Gemke R.G. *Neispravnosti elektricheskikh mashin. 8-ye izd., ispr. i dop.* [Malfunctions of electrical machines. 8th ed., rev. and additional]. L.: Energy Publ., 1995, 296 p.

7. Sukhodolov Yu.V., Belousov A.V., Kruchenok L.P. *Sposob kompleksnogo kontrolya trekhfaznoy elektricheskoy mashiny* [Method of complex control of a three-phase electric machine]. Patent ВУ20042, 11.01.2012.

8. Raúl Esteban, Jimenez Mejia, Guillermo León, Mesa Betancur. Method and system for the detection and diagnosis of faults in electric machines when in operation. Patent WO2014136052A1, 12.09.2014.

9. Suvorov I.F., Gorbunov R.V., Palkin G.A. *Sposob diagnostiki mezhvitkovykh zamykaniy asinkhronnogo elektrodvigatelya* [Method for diagnosing interturn short circuits of an asynchronous electric motor]. Patent RU2529596, 09.27.2014.

10. Zhukovskiy YU.L., Taranov S.I. *Sposob diagnostiki i otsenki ostatochnogo resursa elektroprivodov peremennogo toka* [Way of diagnosing and evaluating the residual resource of alternating current electric drives]. Patent RF, no. 2526500C1, 10.11.2014.

11. Sil'vashko S.A., Bulatov V.N., Shevelenko V.D. *Sposob kompleksnogo kontrolya trekhfaznoy obmotki elektricheskoy mashiny* [A way of comprehensive control of a three-phase winding of an electric machine]. Patent RF, no. 2289143C2, 10.12.2006.

12. Bulatov V.N., Sil'vashko S.A. *Sposob kontrolya trekhfaznoy obmotki elektricheskoy mashiny* [A method of monitoring a three-phase winding of an electric machine]. Patent RF, no. 2339962C1, 2011.

13. Sukhodolov Yu.V., Isaev A.V., Zelenko V.V., Sizikov S.V. *Vozmozhnost' opredeleniya defektov v obmotkakh elektricheskikh mashin chastotnymi metodami* [The possibility of determining defects in the windings of electrical machines by frequency methods]. *Metrologiya i priborostroyeniye* [Metrology and instrument making], 2022, no. 3, pp. 10–17.