

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток электрических машин на параметры тока холостого хода

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Ломтев, В.А. Лычковский

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

Поступила 15.10.2024

Принята к печати 16.11.2024

Методы диагностики, которые поменяются в настоящее время для контроля за состоянием обмоток электрических машин, не позволяют выявлять дефектообразование в них на ранних стадиях развития. А особенно эта проблема актуальна для оборудования, находящегося непосредственно в режиме его эксплуатации. Целью работы являлось рассмотрение и оценка возможности метода, который на основе анализа параметров и характеристик тока холостого хода позволит характеризовать состояния токоведущих частей обмоток диагностируемых электрических машин. В работе представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей влияния уровня дефектного сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин на параметры тока холостого хода, в том числе на особенности изменения параметров его спектральных составляющих. Так же в статье определены аналитические зависимости полученных характеристик влияния и анализируются факторы, определяющие погрешности измерения разрабатываемым методом. Представленный метод на основе анализа параметров спектральных составляющих тока холостого хода предназначен для измерения сопротивления межвитковой изоляции токоведущих частей в обмотках электрических машин в условиях их функционирования, с возможностью фиксирования начала дефектообразования, что позволит в режиме реального времени оценивать его работоспособное, предотказное и исправное состояние.

Ключевые слова: диагностика обмоток электрических машин, межвитковое сопротивление изоляции, ток холостого хода, спектральный состав

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,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: isaevav@bntu.by

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Ломтев,
В.А. Лычковский.

Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток
электрических машин на параметры тока холостого хода.

Приборы и методы измерений.

2024. Т. 15. № 4. С. 307–315.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

For citation:

Isaev AV, Suhodolov YuV, Sizikov SV, Lomtev AA,
Lychkovsky VA.

Influence of the Level of Defective Insulation Resistance
of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current.

Devices and Methods of Measurements.

2024;15(4):307–315. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

Influence of the Level of Defective Insulation Resistance of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current

A.V. Isaev, Yu.V. Suhodolov, S.V. Sizikov, A.A. Lomtev, V.A. Lychkovsky

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

Received 15.10.2024

Accepted for publication 16.11.2024

Abstract

Diagnostic methods that will change at present for monitoring the condition of windings of electric machines do not allow to detect defect formation in them at early stages of development. And this problem is especially relevant for equipment that is directly in its operating mode. The purpose of the work was to consider and evaluate the possibility of a method that, based on the analysis of the parameters and characteristics of the no-load current, will allow to characterize the state of the current-carrying parts of the windings of diagnosed electric machines. The paper presents the results of experimental studies of the patterns of influence of the level of defective resistance of interturn insulation in the windings of electric machines on the parameters of the no-load current, including the features of changes in the parameters of its spectral components. The article also defines analytical dependencies of the obtained characteristics of influence and analyzes the factors that determine the measurement errors of the developed method. The presented method based on the analysis of the parameters of the spectral components of the no-load current is intended for measuring the resistance of the interturn insulation of current-carrying parts in the windings of electrical machines under their operating conditions, with the possibility of recording the onset of defect formation, which will allow real-time assessment of its operational, pre-failure and serviceable state.

Keywords: diagnostics of windings of electric machines, interturn insulation resistance, no-load current, spectral composition

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,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: isaevav@bntu.by

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Ломтев,
В.А. Лычковский.

Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток
электрических машин на параметры тока холостого хода.

Приборы и методы измерений.

2024. Т. 15. № 4. С. 307–315.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

For citation:

Isaev AV, Suhodolov YuV, Sizikov SV, Lomtev AA,
Lychkovsky VA.

Influence of the Level of Defective Insulation Resistance
of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current.
Devices and Methods of Measurements.

2024;15(4):307–315. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

Введение

Одной из наиболее существенных проблем современной энергетики, а также приборо- и станкостроения, является разработка приборов и методов диагностики состояния электрических машин. При этом увеличение эксплуатационных требований к такому оборудованию только усугубляет существующую проблему. И весь комплекс методов и приборов как используемых в промышленности, так и существующих в виде экспериментальных и научных образцов, очень ограниченно позволяет проводить качественную, и самое главное своевременную диагностику электрических машин, которые позволяли бы зафиксировать начало дефектообразование в них на максимально ранних стадиях развития. И, тем более, эти методы малоприспособны для проведения диагностических процедур оборудования, находящегося непосредственно в режиме эксплуатации. Поэтому одной из задач современного приборостроения является разработка приборов и методов или развития уже существующих для возможности их применения для диагностики состояния электрических машин, в том числе и их обмоток, как наиболее слабого места такого оборудования, и оценить их возможность для использования как в качестве инструментов для прогнозирования ресурсов использования диагностируемого оборудования, так и возможности применения этих методов непосредственно в рабочих циклах эксплуатации.

Согласно статистики наиболее слабым и уязвимым местом современных электрических машин является изоляция их токоведущих частей – фазных обмоток [1–2]. Поэтому наибольшее внимание при диагностике такого оборудования уделяется состоянию именно данной части. И большинство методов направлено на оценку состояния именно этой части. В настоящее время все разработанные методы оценки состояния изоляции токоведущих частей можно разделить на три независимые группы: измерение сопротивления изоляции между обмотками электрической машины и его корпусом, измерение сопротивления изоляции между фазными обмотками и измерение межвиткового сопротивления изоляции в фазной обмотке.

Необходимо отметить, что измерения по первым двум группам широко используются в промышленности и диагностических лабораториях [3–6]. Эти методы основаны на измерении общего тока, протекающего в изоляционном материале, который представляет собой сумму трёх компонентов: ток зарядки ёмкости, ток поглощения и ток утечки (или ток проводимости) [4]. Эти составляющие достаточно просто измерить. Однако данные методы позволяют оценить состояние изоляции обмоток на конечных стадиях её разрушения, когда имеет место конечное сопротивление двух, электрически не связанных, частей диагностируемого оборудования (изоляция двух или трёх обмоток, корпуса), т. е. когда при контроле и измерениях можно на невысоком уровне оценить только работоспособность уже неисправного диагностируемого оборудования. И данные методы в большей степени направлены на безопасность человека – что, конечно, важно, но минимально характеризует состояние самого оборудования.

Поэтому поставленную задачу можно решить только путём проведения измерений по третьей группе. При этом существующие методы контроля состояния фазных обмоток электрических машин обладают самым разнообразным набором признаков, которые в свою очередь позволяют систематизировать их применение [6–10]. Однако одними из самых активно развивающихся на сегодняшний день методов являются методы, определяющие состояние электрических машин по анализу тока или напряжения холостого хода [11–12]¹.

Но даже с учётом высокой достоверности результатов диагностики этими методами они больше применимы в диагностических лабораториях при исследовании и малоприспособны в условиях эксплуатации оборудования на производстве. Потенциал у этих методов огромный и в настоящее время не исчерпан для решения поставленной нами задачи.

Целью данной работы являлась оценка возможности определения текущего состояния токоведущих частей обмоток трехфазных

¹ ГОСТ ISO 20958-2015: Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя: введ. 11.01.16. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

электрических машин со всыпной обмоткой на основе анализа параметров и характеристик тока холостого хода.

Основная часть

Проведённые в работе [13] исследования указывают, что представленные там временные зависимости тока холостого хода показывают на зависимость уровня дефектного сопротивления между витками в обмотке диагностируемого электродвигателя на изменения сдвига фазы первой спектральной составляющей относительно фаз остальных, высших спектральных составляющих. Проведя дополнительный ряд исследований и выполнив анализ представленных зависимостей тока холостого хода на изменения параметров его отдельных спектральных составляющих, можно сделать вывод, что основными информативными параметрами могут являться уровень (т. е. суммарная амплитуда) высших спектральных составляющих (т. е. результирующей кривой тока холостого хода, полученной путём сложения высших спектральных составляющих) и изменение (сдвиг) фазы первой спектральной составляющей относительно входного напряжения и (или) суммы высших спектральных составляющих (рисунок 1). Однако изменения амплитуды при витковом замыкании характеризуются невысокой точностью измерений при стандартных условиях. Это связано как с нестабильностью параметров исходного сигнала (нестабильность сетевого напряжения по амплитуде, наличие высших гармоник и др.), так и с сильным влиянием на параметры самого измерительного сигнала помех от диагностируемого мощ-

ного электромагнитного оборудования. Поэтому, в качестве наиболее оптимальных измерительных параметров были выбраны временные зависимости.

Дальнейшая обработка результатов и анализ полученных зависимостей кривых тока холостого хода показали, что основным параметром, наиболее изменяющимся при витковым замыкании, является взаимное расположение на временной оси точек перехода через ноль первой спектральной составляющей (кривая 3, рисунки 1а и 1б) и точек перехода через ноль результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих (рисунки 1а и 1б, кривая 4). При этом наиболее целесообразно использовать для анализа временной интервал между переходом первой спектральной составляющей из положительной в отрицательную область, обозначенный на рисунках 1а и 1б точкой t_{01} , и следующим после зафиксированной первой характерной точки переходом через ноль из отрицательной в положительную результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих (т. е. ближайшая к $t = T/2$), обозначенным на рисунках 1а и 1б точкой $t_{0\Sigma 2}$.

Исследования, проведённые с подобными электродвигателями мощностью от 150 Вт до 5,5 кВт не зависимо от количества пар обмоток, показали аналогичные результаты.

В результате проведения комплекса измерений, оценивающих влияние уровня дефектного межвиткового сопротивления на время между характерными точками кривых спектральных составляющих тока холостого хода (рисунок 2), получен набор данных (таблица 1).

Таблица 1 / Table 1

Изменение промежутка времени между характерными точками кривых спектральных составляющих тока холостого хода от уровня сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электродвигателя

Change in the time interval between characteristic points of the curves of the spectral components of the no-load current from the level of resistance of the interturn insulation in the windings of the electric motor

Исследуемый электродвигатель/ The electric motor under study	Дефектное межвитковое сопротивление / Defective interturn resistance, Ом											
	1	10	25	50	100	150	250	500	1000	5000	7500	10000
АИР63В4У3/ AIR63V4U3	3.42	2.59	1.992	1.52	1.125	0.905	0.721	0.680	0.649	0.641	0.641	0.641
АО42-6/ AO42-6	3.91	2.69	1.92	1.32	0.79	0.605	0.425	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42

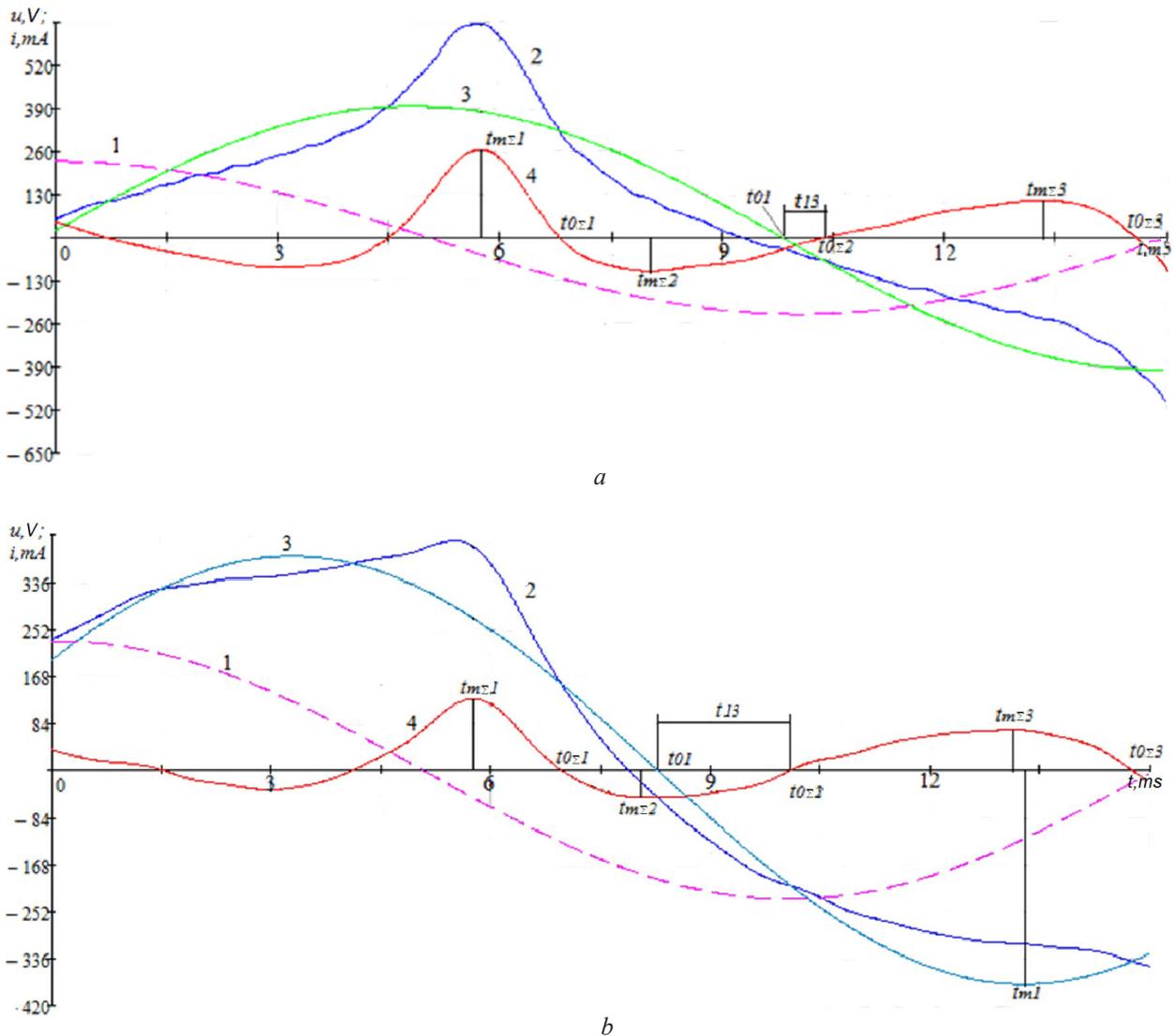


Рисунок 1 – Спектральные составляющие тока холостого хода обмотки двигателя AIR63V4U3: *a* – кривые тока холостого хода при исправном состоянии; *b* – кривые тока холостого хода при межвитковом замыкании через сопротивление 10 Ом. 1 – кривая входного синусоидального напряжения; 2 – кривая тока холостого хода фазной обмотки; 3 – кривая первой спектральной составляющей тока холостого хода; 4 – результирующая кривая тока холостого хода, полученная путём сложения высших спектральных составляющих; $t_{0\Sigma 1}, t_{0\Sigma 2}$ и $t_{0\Sigma 3}$ – точки перехода исследуемого сигнала через ноль в пределах одного периода; $t_{m\Sigma 1}, t_{m\Sigma 2}$ и $t_{m\Sigma 3}$ – точки, соответствующие максимумам кривой тока в пределах одного периода

Figure 1 – Spectral components of the no-load current of the winding of the AIR63V4U3 motor: *a* – no-load current curves in good condition; *b* – no-load current curves with an interturn short circuit through a 10 Ohm resistance. 1 – input sinusoidal voltage curve; 2 – no-load current curve of the phase winding; 3 – curve of the first spectral component of the no-load current; 4 – resulting curve of the no-load current obtained by adding up the higher spectral components; $t_{0\Sigma 1}, t_{0\Sigma 2}$ and $t_{0\Sigma 3}$ – points of transition of the studied signal through zero within one period; $t_{m\Sigma 1}, t_{m\Sigma 2}$ and $t_{m\Sigma 3}$ – points corresponding to the maxima of the current curve within one period

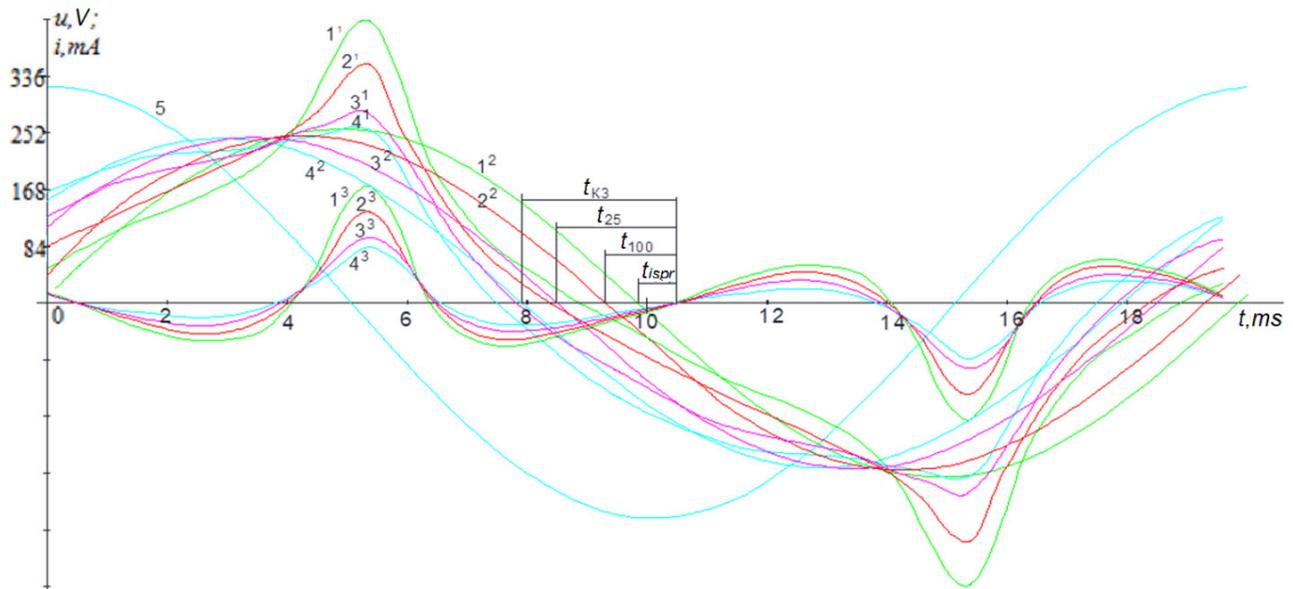


Рисунок 2 – Изменение параметров спектральных составляющих тока холостого хода (XX) от уровня сопротивления межвитковой изоляции в обмотках двигателя АИР63В4У3. 1 – кривые тока XX исправной обмотки; 2 – кривые тока XX при межвитковом сопротивлении 100 Ом; 3 – кривые тока XX при межвитковом сопротивлении 25 Ом; 4 – кривые тока XX с короткозамкнутыми витками; 5 – кривая входного синусоидального напряжения; x^1 – суммарная кривая тока XX; x^2 – кривая первой спектральной составляющей; x^3 – суммарная кривая высших спектральных составляющих

Figure 2 – Change in the parameters of the spectral components of the no-load current (NLC) from the level of interturn insulation resistance in the windings of the AIR63V4U3 motor. 1 – curves of the NC current of the serviceable winding; 2 – curves of the NC current with an interturn resistance of 100 Ohm; 3 – curves of the NC current with an interturn resistance of 25 Ohm; 4 – curves of the NC current with short-circuited turns; 5 – curve of the input sinusoidal voltage; x^1 – total curve of the NC current; x^2 – curve of the first spectral component; x^3 – total curve of higher spectral components

Результаты исследования для рассматриваемых двигателей позволили с помощью программного обеспечения MathCad сформировать аналитическую зависимость (1), которая характеризует связь интервала времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и кривой, которая получена путём сложения высших спектральных составляющих, с величиной сопротивления межвитковой изоляции в дефектной обмотке, а также получить коэффициенты полинома для каждого из исследуемых электрических двигателей (таблица 2). Это в свою очередь позволило построить кривые зависимости времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих, от величины сопротивления межвитковой изоляции в дефектной обмотке.

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

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 путём сложения высших спектральных составляющих.

В соответствии с полученными коэффициентами выполнено построение промоделированных зависимостей интервала времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих от величины межвиткового сопротивления в обмотках (рисунок 3).

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты математической зависимости времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих от величины сопротивления межвитковой изоляции в неисправной обмотке для исследуемых двигателей

Coefficients of the mathematical dependence of the time between zero-crossings of the first spectral component and the resulting curve obtained by adding the higher spectral components from the value of the interturn insulation resistance in the faulty winding of the motors under study

Коэффициент / Coefficient	АИР63В4У3 / AIR63V4U3	АО42-6 / AO42-6
<i>a</i>	3.9180	4.6200
<i>b</i>	-0.5343	-0.7745
<i>c</i>	0.0347	0.0561
<i>d</i>	$-1.1623 \cdot 10^{-3}$	$-2.0896 \cdot 10^{-3}$
<i>e</i>	$2.1755 \cdot 10^{-5}$	$4.3500 \cdot 10^{-5}$
<i>f</i>	$-2.3021 \cdot 10^{-7}$	$-5.1125 \cdot 10^{-7}$

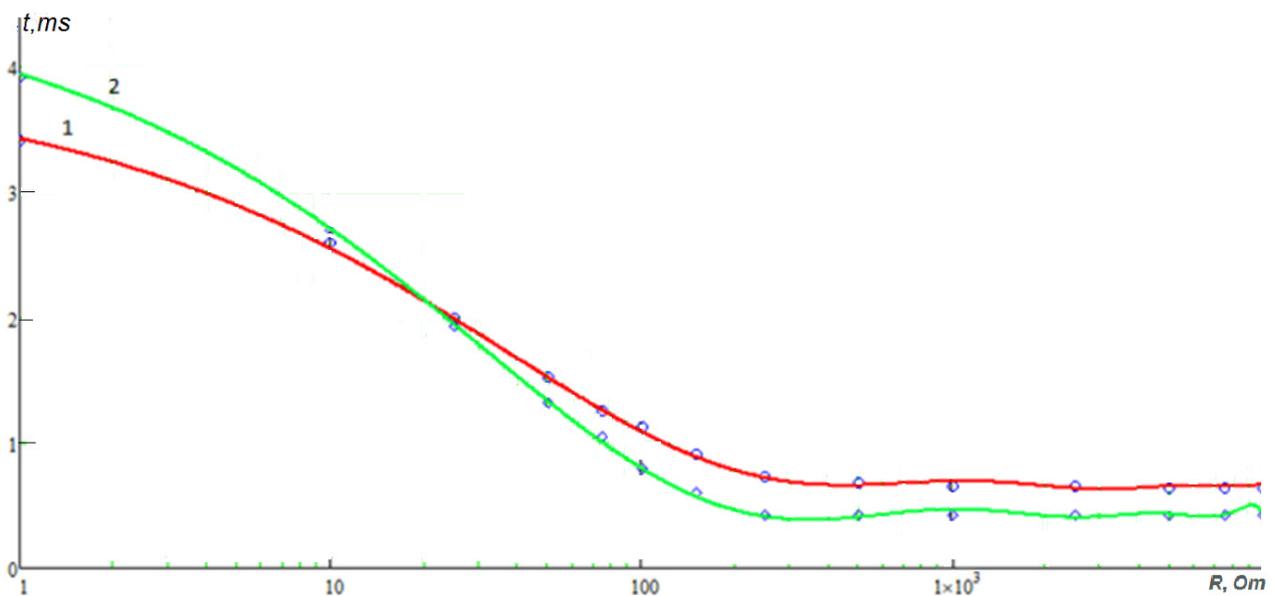


Рисунок 3 – Влияние величины сопротивления межвитковой изоляции в дефектной обмотке исследуемых двигателей на время между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих; 1 – электродвигатель АИР63В4У3; 2 – электродвигатель АО42-6; \diamond , \circ – экспериментальные значения

Figure 3 – The influence of the magnitude of the interturn insulation resistance in the defective winding of the studied motors on the time between zero-crossings of the first spectral component of the no-load current and the resulting curve obtained by adding the higher spectral components; 1 – AIR63V4U3 electric motor; 2 – AO42-6 electric motor; \diamond , \circ – experimental values

Анализ полученных кривых показал, что в области сопротивлений от 100 до 300 Ом (в зависимости от мощности диагностируемых электрических машин), характеристики имеют зависимость, которая может быть использована для оценки состояния обмоток диагностируемых

электрических машин. При этом относительное отклонение полученных аналитических зависимостей относительно экспериментальных данных для исследуемых двигателей в соответствии с формулой (2) представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Относительное отклонение полученных математических зависимостей от экспериментальных данных
Relative deviation of the obtained mathematical dependencies from the experimental data

Дефектное межвитковое сопротивление Defective interturn resistance, Ом	Относительное отклонение / Relative deviation, %	
	АИР63В4У3 / AIR63V4U3	АО42-6 / AO42-6
1	-0.510007	-0.74194
10	1.884717	-0.349395
25	0.463705	-1.036666
50	0.20594	-0.67322
75	-0.300573	4.937316
100	3.692751	-0.363588
150	2.56792	4.626284
250	0.829355	4.577137
500	3.460188	4.234727
1000	-6.120721	-6.248361
2500	2.378435	4.620595

$$\Delta t_{\Delta\varphi} = \frac{(t_{\Delta\varphi_u} - t_{\Delta\varphi_M})}{t_{\Delta\varphi_u}}, \quad (2)$$

где $t_{\Delta\varphi_u}$ – измеренное время между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих; $t_{\Delta\varphi_M}$ – значение времени, полученное из математической зависимости.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что полученные математические зависимости могут иметь отклонение до 15 % относительно экспериментальных данных, однако в области неисправных обмоток (сопротивление до 1 кОм) относительное отклонение не превышает 5 %.

Дополнительные исследования показали, что на изменение интервала времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих (а именно изменения начальной фазы первой спектральной составляющей) влияет только величина межвитковых сопротивлений в обмотках, при этом влияние местоположения дефектов в обмотках, а также количества витков, задействованных в месте дефекта, малозначительно.

Заключение

Разработан метод, позволяющий эффективно проводить диагностику состояния обмоток электрических машин, в том числе в режиме реального времени при их эксплуатации. Метод представляет собой косвенное измерение сопротивления изоляции токоведущих частей электрических машин, основанный на анализе изменения параметров отдельных спектральных составляющих тока холостого хода, что позволяет фиксировать дефектообразование в них на максимально ранних стадиях развития, а, следовательно, оценивать в режиме реального времени его работоспособное, предотказное и исправное состояния.

Список использованных источников

1. Дудкин, А.Н. Обеспечение качества и надежности электрических машин / А.Н. Дудкин, А.П. Матялис, О.П. Муравлев // Известия Томского политехнического университета. 2000. – Т. 303. – № 1. – С. 266-269
2. Review, J.L. Failures of Electrical Machines – Review, J.L., Pavel T. Department of Materials and Technology, Faculty of Electrical Engineering University of West Bohemia Pilsen, Czech republic 2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE).
3. Измерение сопротивления изоляции: руководство [Электронный ресурс]. – 1997 – 2024

"СвязьКомплект" (ООО "КаталогСервис", ОГРН: 1097746354474) – Режим доступа: <https://skomplekt.com/izmerenie-soprotivleniia-izoliatcii/>

4. Adam Decner, Marcin Baranski, Tomasz Jarek, Sebastian Berhausen Methods of Diagnosing the Insulation of Electric Machines Windings Energies. – 2022. – Vol. 15, no. 8465. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8465>

5. "A Stitch In Time" The Complete Guide to Electrical Insulation Testing, 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.instrumart.com/assets/Megger-Guide-to-Insulation-Testing.pdf>

6. Грунтович Н.В. Комплексное техническое диагностирование электротехнического оборудования – основа системы ремонтов «по состоянию» / Н.В. Грунтович, Н.И. Грачек // Горн. журн. – 2003. – № 7. – С. 67–69.

7. Исмагилов Ф.Р. Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электро-механических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Д.Ю. Пашали, О.А. Бойкова // Уфа: Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 4 (39). – С. 73–79.

8. ISO 13379 (all parts). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques. – 2012. – P. 33.

9. Новейшие системы диагностики состояния электродвигателей, 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kart.od.ua/Sistema_diagnostiki.html

10. Измерение сопротивления изоляции электрооборудования: нормы и рекомендации, 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://test-energy.ru/soprotivlenie-izolyacii-ehlektrooborudovaniya-normy-i-rekomendacii-po-izmereniyu/>

11. Cruz S.M.A. Stator winding fault diagnosis in threephase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach / S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso // IEEE Trans. Ind. A. – 2001. – Vol. 37. – P. 1227–1233.

12. Cardoso A.J.M. Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating threephase induction motors by Paris's vector approach / A.J.M. Cardoso, E.S. Saraiva // IEEE Trans. Ind. A. – 1993. – Vol. 29. – P. 897–901.

13. 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. 17–23.

References

1. Dudkin AN, Matyalis AP, Muravlev OP. Ensuring the quality and reliability of electrical machines. Bulletin of Tomsk Polytechnic University, 2000; 303(1):266-269.

2. Review JL, Pavel T. Failures of Electrical Machines. Department of Materials and Technology, Faculty of Electrical Engineering University of West Bohemia Pilsen, Czech republic 2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE).

3. *Izmereniye soprotivleniya izolyatsii: rukovodstvo* [Insulation resistance measurement: manual] [Electronic resource]. 1997–2024 "SvyazKomplekt" (ООО "КаталогСервис", ОГРН: 1097746354474) – Access mode: <https://skomplekt.com/izmerenie-soprotivleniia-izoliatcii/>

4. Adam Decner, Marcin Baranski, Tomasz Jarek, Sebastian Berhausen Methods of Diagnosing the Insulation of Electric Machines Windings Energies. 2022;15(8465).

5. "A Stitch In Time" The Complete Guide to Electrical Insulation Testing, 2006. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.instrumart.com/assets/Megger-Guide-to-Insulation-Testing.pdf>

6. Gruntovich NV, Grachek NI. Comprehensive technical diagnostics of electrical equipment – the basis of the "condition-based" repair system. Mining journal. 2003;(7):67-69.(In Russ.).

7. Ismagilov FR [et al.]. Review of modern methods and means of operational diagnostics of electromechanical energy converters. Ufa: Bulletin of Ufa State Agrarian University, 2010;14;4(39):73-79. (In Russ.).

8. ISO 13379 (all parts). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques. 2012. 33 p.

9. *Noveyshiye sistemy diagnostiki sostoyaniya elektrodvigatelye* [The latest systems for diagnosing the condition of electric motors] [Electronic resource]. – Electronic data. – M., [2011]. – Access mode: http://kart.od.ua/Sistema_diagnostiki.html.

10. *Izmereniye soprotivleniya izolyatsii elektrooborudovaniya: normy i rekomendatsii* [Measurement of insulation resistance of electrical equipment: standards and recommendations] [Electronic resource]. 2011. Electronic data. Access mode: <https://test-energy.ru/soprotivlenie-izolyacii-ehlektrooborudovaniya-normy-i-rekomendacii-po-izmereniyu/>

11. Cruz S.M.A, Cardoso A.J.M. Stator winding fault diagnosis in threephase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach. IEEE Trans. Ind. A. 2001;37:1227-1233.

12. Cardoso A.J.M, Saraiva ES. Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating threephase induction motors by Paris's vector approach. IEEE Trans. Ind. A. 1993;29:897-901.

13. Isaev AV. [et al.]. Determination of defects in windings of electrical machines by parameters of the no-load current spectrum. Metrology and instrument making. 2022;1:17-23. (In Russ.).