

Оценка состояния электрических машин на основе математического моделирования дефектообразования в обмотках

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, Д.В. Балахонов

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

Поступила 18.10.2022

Принята к печати 21.11.2022

Максимально качественная и своевременная диагностика состояния обмоток электрических машин различного типа, в том числе и обмоток асинхронных двигателей, область применения которых с каждым годом увеличивается, является актуальной проблемой. Среди существующих методов диагностики в настоящее время наиболее перспективными являются способы, основанные на методах анализа резонансных процессов, протекающих в электрических машинах. Целью работы являлась оценка возможности применения резонансных процессов, протекающих в электрических машинах, для качественной диагностики состояния их обмоток на примере асинхронных двигателей, построение математических моделей дефектообразования в обмотках, позволяющих описать дефектообразование в обмотках, и анализ отклонения математических моделей относительно полученных экспериментальных результатов.

Проведён анализ влияния уровня межвитковых сопротивлений, количества замкнутых витков и местоположение замкнутых витков в секциях на фазочастотные характеристики обмоток асинхронных двигателей различного класса. Получены математические модели фазочастотных характеристик, определены коэффициенты полиномов и оценено относительное расхождение этих математических зависимостей относительно экспериментальных данных в зависимости от рассматриваемых параметров, характеризующих дефекты в обмотках катушек электрических машин.

Полученные математические модели дефектообразования в обмотках и коэффициенты для этих зависимостей могут служить основой для построения автоматизированных контрольно-диагностических систем для проверки состояния обмоток электрических машин, в том числе и оценки остаточного ресурса их работы.

Ключевые слова: диагностика обмоток электрических машин, фазочастотные характеристики обмоток, межвитковое сопротивление, количество замкнутых витков, местоположение замкнутых витков в секциях.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-302-313

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: isaev0302@gmail.com

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, Д.В. Балахонов.
Оценка состояния электрических машин на основе
математического моделирования дефектообразования в обмотках.
Приборы и методы измерений.
2022. – Т. 13, № 4. – С. 302–313.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-302-313

For citation:

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, D.V. Balakhonov.
[Assessment of Electrical Machines' State Based on Mathematical
Modeling of Defect Formation in Windings].
Devices and Methods of Measurements.
2022, vol. 13, no. 4, pp. 302–313 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-302-313

Assessment of Electrical Machines' State Based on Mathematical Modeling of Defect Formation in Windings

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, D.V. Balakhonov

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

Received 18.10.2022

Accepted for publication 21.11.2022

Abstract

The highest quality and timely diagnostics of windings' state of various types of electrical machines including of asynchronous motors' windings is an important task. Among the existing diagnostic methods currently the most promising are those ones based on methods for analyzing resonance processes occurring in electrical machines. The aim of the article was to assess the possibility of use resonant processes occurring in electrical machines for qualitative diagnostics of their windings state using the asynchronous motors example, to build mathematical models that allow describing defect formation in windings and to analyze the deviation of mathematical models relative to the results obtained.

Analysis of the influence of the level of interturn resistances, the number of closed turns and the location of closed turns in sections on the phase-frequency characteristics of asynchronous motors windings of various classes has been carried out. Mathematical models of the phase-frequency characteristics are obtained, coefficients of polynomials are determined and the relative discrepancy between these mathematical dependences relative to the experimental data is estimated depending on the considered parameters characterizing defects in the coils' windings of electrical machines.

Obtained mathematical models and coefficients for them can serve as the basis for construction of automated control and diagnostic systems for checking of the windings state of electrical machines including assessing the residual life of their work.

Keywords: diagnostics of electrical machines windings, phase-frequency characteristics of windings, interturn resistance, number of closed turns, location of closed turns in sections.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-302-313

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: isaev0302@gmail.com

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, Д.В. Балахонov.
Оценка состояния электрических машин на основе
математического моделирования дефектообразования в обмотках.
Приборы и методы измерений.
2022. – Т. 13, № 4. – С. 302–313.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-302-313

For citation:

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, D.V. Balakhonov.
[Assessment of Electrical Machines' State Based on Mathematical
Modeling of Defect Formation in Windings].
Devices and Methods of Measurements.
2022, vol. 13, no. 4, pp. 302–313 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-302-313

Введение

Максимально качественная и своевременная диагностика состояния обмоток электрических машин различного типа, в том числе и обмоток асинхронных двигателей, область применения которых с каждым годом увеличивается, является актуальной проблемой. При этом констатация факта различными измерительными системами о неисправном состоянии двигателя чаще всего является неактуальной и запоздалой, приводящей в конечном счёте к выходу из строя всей производственной линии, где он был установлен. Поэтому сегодня активно ведутся исследования по разработке методик, позволяющих как можно на более ранних стадиях зафиксировать процесс, говорящий о появлении проблем в таких приборах. Из представленных на современном рынке подходов к диагностике состояния обмоток электрических машин (ЭМ) наиболее перспективными являются методы, прямыми или косвенными способами фиксирующие изменение параметров обмотки, в качестве которых чаще всего выступают активное и реактивное сопротивление катушки. Известны способы, позволяющие непосредственно определять активное и реактивное сопротивление фазной катушки [1–4] и путём сравнения с номинальным значением исправной или попарного сравнения полных сопротивлений обмоток электродвигателя относительно друг друга делать заключение о состоянии обмоток в частности, а значит и всего двигателя в общем. Данные методы позволяют только сделать заключение о выходе из строя ЭМ, но мало пригодны для выявления уменьшения сопротивления изоляции обмоток. Также диагностические процедуры данными методами не всегда возможны для современных ЭМ или сопряжены со сложными механическими работами.

Наиболее перспективными методами диагностики являются методы, определяющие номинальные значения сопротивлений по косвенным признакам. Так, известны способы, позволяющие определять расхождение амплитуд сигналов токов, напряжений и мощности каждой фазы путём расчёта коэффициентов несимметрии тока, напряжений, мощности и коэффициентов гармонических колебаний определять техническое состояние электропривода и оценивать остаточный ресурс [5]. Также

существует способ диагностирования изоляции обмоток статора асинхронного двигателя (АД) [6], при котором производится измерение действующих значений токов и напряжений статора АД при номинальной частоте вращения электродвигателя, тока утечки на корпус и напряжения на корпусе относительно искусственной нулевой точки, образованной фильтром напряжения нулевой последовательности, подключённым к фазам питающей сети. Значения токов и напряжений статора электродвигателя позволяют рассчитать полное сопротивление обмоток статора и осуществить сравнение этих значений как со значениями, записанными на заведомо исправном АД, так и сравнение между значениями, полученными с двух обмоток.

Известны способы, определяющие параметры обмотки по электродвижущей силе (ЭДС) самоиндукции, возникающей в обмотках ЭМ. Например, метод, основанный на измерении ЭДС обмотки АД при вращении вала по инерции после отключения питающего напряжения, в том числе и измерением частоты колебаний ЭДС, где сравнивают полученные значения диагностики со значениями, измеренными на исправном электродвигателе, и по результатам сравнения делают вывод о наличии межвитковых замыканий [7, 8].

Однако представленные методы основаны на сравнительном анализе получаемых данных с эталонными (т. е. данными исправных ЭМ), что не всегда доступно в рамках предприятия. Кроме этого, для оценки остаточного срока службы используются математические модели (например, многофакторная детерминированная модель прогноза [9, 10]), что мало пригодно в рамках того же предприятия и, следовательно, не может быть применено на практике. Поэтому всё большее распространение получают методы, основанные на анализе частотных характеристик обмоток катушек АД, в том числе и связанных с резонансными явлениями, происходящими в них. В работе [11] предложен способ, который основан на особенностях фазовых спектров, полученных в результате наложения спектра суперпозиции двух импульсных последовательностей, подаваемых от генератора импульсов на обмотки фаз объекта контроля, на амплитудно-частотные характеристики фазной обмотки, а в [12, 13] оцениваются особенности фазовых спектров

последовательностей импульсов прямоугольной формы, полученных по точкам перехода напряжений k -х гармоник, выделенных на частоте $\omega_0 = 2k\pi/T$, через ноль. Однако, как показали работы [14–16], контроль резонансных проявлений в катушках обладает максимальной чувствительностью к дефектам в обмотках и поэтому может служить основой для проведения диагностики и контроля состояния на самых ранних стадиях выхода ЭМ из строя.

Целью работы являлась оценка возможности применения резонансных процессов, протекающих в электрических машинах, для качественной диагностики состояния их обмоток на примере асинхронных двигателей, построение математических моделей, позволяющих описать дефектообразование в обмотках, и анализ отклонения математических моделей дефектообразования в обмотках относительно полученных экспериментальных результатов.

Основная часть

Одной из целей операций диагностики является оценка работоспособности асинхронных двигателей на протяжении определённого периода времени. Учитывая, что

возникновение дефекта изоляции в обмотках чаще всего является не мгновенным процессом, а протекает в течение определённого периода эксплуатации, то для предотвращения аварийных режимов работы особенно актуален вопрос разработки методики контроля и диагностики состояния обмоток ЭМ, которую можно использовать, в том числе, и для решения задач оценки их работоспособности. Проведён анализ влияния уровня межвитковых сопротивлений, количества замкнутых витков и местоположения замкнутых витков в секциях на фазочастотные характеристики (ФЧХ) обмоток различных АД. В качестве образцов использовали ЭМ, параметры которых приведены в таблице 1, со специально сформированными обмотками, в которых в определённых местах сделаны выводы от витков и к этим выводам можно подключать внешние сопротивления, имитирующее переходное межвитковое.

В результате проведённого комплекса измерений получены семейства ФЧХ для различных сопротивлений, имитированных в месте виткового замыкания. Так, ФЧХ при разных значениях межвитковых сопротивлений обмоток для АД АИР63В4У3 представлены на рисунке 1.

Таблица 1/Table 1

Параметры исследуемых асинхронных двигателей

Parameters of investigated asynchronous motors

Параметр Parameter	Исследуемый асинхронный двигатель Researched asynchronous motor				
	АИР63В4У3	КР71.1/4	МОЛЛ Y3-80В4	АО42-6	АО2-32-4
Мощность, кВт Power, kWt	0.37	0.22	0.75	1.7	3
Напряжение (подключение звезда), В Voltage (star connection), V	400	400	400	400	400
Ток (подключение звезда), А Current (star connection), A	1	0.65	1.8	4.5	7.5
Номинальная частота вращения, об/мин Rated speed, rpm	1320	660	1420	930	1430
Количество обмоток / количество пар полюсов Number of windings / number of pairs	4/2	8/4	4/2	6/3	4/2
Коэффициент полезного действия Efficiency	75	82	80.2	85	82

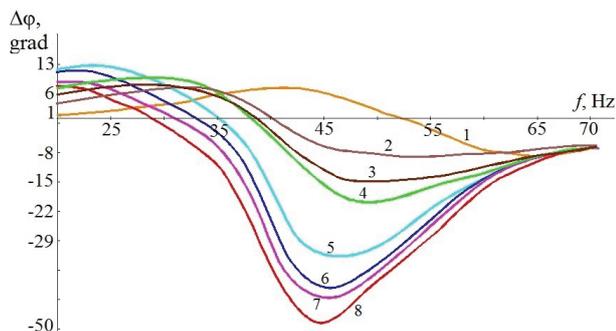


Рисунок 1 – Фазочастотные характеристики асинхронного двигателя АИР63В4У3 при разных значениях межвитковых сопротивлений обмоток: 1 – исправный двигатель; 2 – 10 кОм; 3 – 5 кОм; 4 – 3.6 кОм; 5 – 1 кОм; 6 – 510 Ом; 7 – 180 Ом; 8 – 10 Ом (неисправный двигатель)

Figure 1 – The phase-frequency characteristics of the asynchronous engine AIR63V4U3 at different values of the interturn resistance of the windings: 1 – a working engine; 2 – 10 kOhm; 3 – 5 kOhm; 4 – 3.6 kOhm; 5 – 1 kOhm; 6 – 510 Ohms; 7 – 180 Ohms; 8 – 10 Ohms (faulty engine)

Согласно представленным характеристикам можно сделать вывод, что наличие в витках обмоток асинхронных двигателей участков с пониженным межвитковым сопротивлением существенно влияет на величину максимума характеристики. Соответственно, зная величину максимума, можно оценить текущий уровень межвиткового сопротивления в наиболее проблемном месте обмотки асинхронного двигателя и дальнейшую его работоспособность. Проведя аналогичные измерения для остальных рассматриваемых двигателей, получим семейства ФЧХ, зависящие от уровня межвитковых сопротивлений (рисунок 2).

Согласно полученному массиву данных влияния сопротивления на разность фаз для рассматриваемых АД, найдём математическую зависимость полученных характеристик. Для этого выполним аппроксимацию полученных данных методом наименьших квадратов. Комплекс исследований показал, что наиболее точная математическая зависимость имеет вид полинома:

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

где a, b, c, d, e – начальные значения коэффициентов при R в полиноме; i – номер выбранного АД; R – сопротивление в месте дефекта.

В результате с помощью программного обеспечения *Mathcad* для выбранных АД получены коэффициенты, позволяющие математически

описать представленные зависимости, характеризующие межвитковое сопротивление в обмотках (таблица 2) и в соответствии с этими коэффициентами выполнено построение промоделированных зависимостей максимума ФЧХ от межвитковых сопротивлений (рисунок 3).

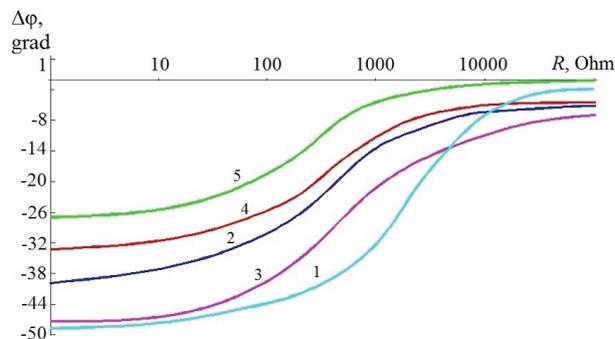


Рисунок 2 – Зависимость максимума фазочастотной характеристики асинхронных двигателей от межвитковых сопротивлений в неисправной обмотке: 1 – АД АИР63В4У3; 2 – АД КР71.1/4; 3 – АД МОЛЛ У3-80В4; 4 – АД АО42-6; 5 – АД АО2-32-4

Figure 2 – The dependence of the maximum of the phase-frequency characteristics of asynchronous engines on the interturn resistances in a faulty winding: 1 – AIR63V4U3; 2 – КР71.1/4; 3 – Moll Y3-80B4; 4 – АО42-6; 5 – АО2-32-4

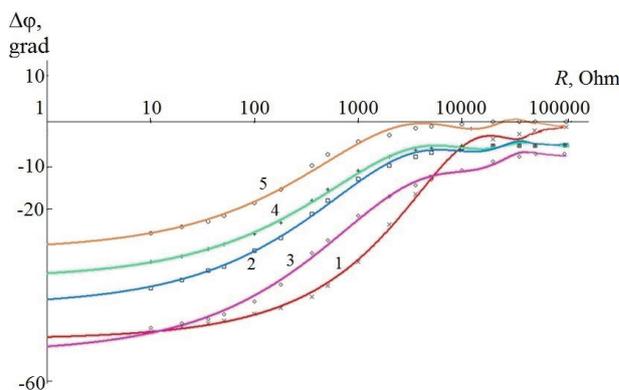


Рисунок 3 – Промоделированные зависимости максимума фазочастотных характеристик от межвитковых сопротивлений для выбранных асинхронных двигателей: 1 – АД АИР63В4У3; 2 – АД КР71.1/4; 3 – АД МОЛЛ У3-80В4; 4 – АД АО42-6; 4 – АД АО2-32-4; Δ, \diamond, \circ – измеренные значения максимума фазочастотных характеристик при соответствующих сопротивлениях в месте дефекта

Figure 3 – The modelled dependencies of the maximum of phase-frequency characteristics on interturn resistances for selected asynchronous engines: 1 – AIR63V4U3; 2 – КР71.1/4; 3 – Moll Y3-80B4; 4 – АО42-6; 4 – АО2-32-4; Δ, \diamond, \circ – measured values of the maximum of phase-frequency characteristics with appropriate resistance at the site of the defect

Таблица 2/Table 2

Значения коэффициентов в математической зависимости максимума фазочастотных характеристик от межвитковых сопротивлений для выбранных асинхронных двигателей

The values of coefficients in the mathematical dependence of the maximum phase-frequency characteristics on interturn resistances for selected asynchronous motors

Коэффициент Coefficient	АИР63В4У3 AIR63V4U3	КР71.1/4 КР71.1/4	МОЛЛ Y3-80В4 MOLL Y3-80B4	АО42-6 АО42-6	АО2-32-4 АО2-32-4
<i>a</i>	-49.71	-35.8	-41.99	-52.81	-29.34
<i>b</i>	0.573	1.23	1.45	1.51	1.307
<i>c</i>	$2.899 \cdot 10^{-3}$	$-1.84 \cdot 10^{-2}$	$-2.2 \cdot 10^{-2}$	$-2.16 \cdot 10^{-2}$	$-2.15 \cdot 10^{-2}$
<i>d</i>	$-6.37 \cdot 10^{-5}$	$1.26 \cdot 10^{-4}$	$1.546 \cdot 10^{-4}$	$1.477 \cdot 10^{-4}$	$1.59 \cdot 10^{-4}$
<i>e</i>	$-4.08 \cdot 10^{-10}$	$4.70 \cdot 10^{-10}$	$5.98 \cdot 10^{-10}$	$5.559 \cdot 10^{-10}$	$6.48 \cdot 10^{-10}$

В таблице 3 представлено относительное расхождение полученных математических зависимостей относительно экспериментальных данных для уровня сопротивлений 10 Ом, 1 кОм и 10 кОм для исследуемых двигателей в соответствии с формулой (2):

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

где $\Delta\varphi_u$ – измеренное значение разности фаз; $\Delta\varphi_m$ – значение, полученное из математической зависимости.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что полученные математические зависимости относительно экспериментальных

данных могут иметь расхождение до 15 %, а в области неисправных обмоток (сопротивление до 1 кОм) относительное расхождение не превышает 5 %.

Для получения более достоверных данных о состоянии обмоток необходимо оценить влияние количества замкнутых витков на результаты измерения. В общем виде влияние количества короткозамкнутых витков на изменение фаз, выбранных для анализа АД при уровне межвитковых сопротивлений в 100 кОм (полностью исправное состояние обмоток ЭМ), 1 кОм (условный уровень исправного состояния) и 10 Ом (условие гарантированного выхода из строя) представлены на рисунке 4.

Таблица 3/Table 3

Относительное расхождение математических зависимостей относительно экспериментальных данных в зависимости от межвиткового сопротивления

Relative discrepancy between mathematical dependences relative to experimental data depending on the interturn resistance

Сопротивление в месте дефекта, Ом Resistance at the defect site, Ohm	АИР63В4У3 AIR63V4U3	КР71.1/4 КР71.1/4	МОЛЛ Y3-80В4 MOLL Y3-80B4	АО42-6 АО42-6	АО2-32-4 АО2-32-4
10	0.062	0.018	0.065	0.021	0.009
1000	0.048	0.016	0.011	0.017	0.018
100000	0.128	0.094	0.018	0.112	0.0141

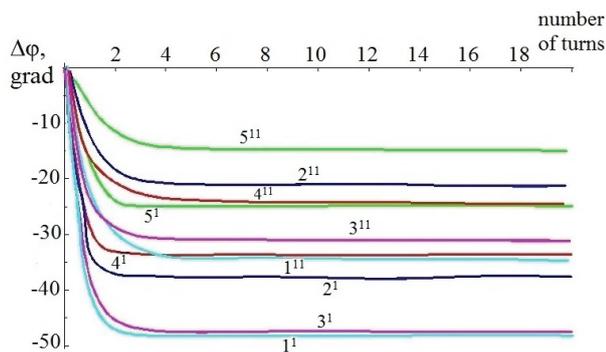


Рисунок 4 – Зависимости величины частотного максимума фазовых соотношений от числа короткозамкнутых витков для выбранных асинхронных двигателей: x^1 – сопротивление в месте дефекта 10 Ом; x^{11} – сопротивление в месте дефекта 1 кОм; 1 – АД АИР63В4У3; 2 – АД КР71.1/4; 3 – MOLL Y3-80B4; 4 – АД АО42-6; 5 – АД АО2-32-4

Figure 4 – Dependence of the value of the frequency maximum of phase ratios on the number of short-circuited turns for selected asynchronous engines: x^1 – resistance at the site of the defect 10 Ohms; x^{11} – resistance at the site of the defect 1 kOhm; 1 – AIR63V4U3; 2 – KP71.1/4; 3 – Moll Y3-80B4; 4 – AO42-6; 5 – AO2-32-4

Анализ зависимостей показал незначительное влияние количества замкнутых витков на уровень первого частотного максимума фазовых соотношений и что, начиная с 3–5-ти замкнутых витков (в зависимости от привода), характеристика приобретает линейный вид и перестаёт зависеть от количества замкнутых витков, в том числе и через сопротивления в 1 кОм. Данное исследование позволяет сделать вывод, что при организации процедур диагностики можно провести допущение, при котором анализ будет проводиться для самого неблагоприятного случая для проведения контроля, где дефект в изоляции затрагивает только два соседних витка.

Аналогично предыдущему этапу определим математическую зависимость представленных характеристик. Для этого выполним аппроксимацию методом наименьших квадратов, выбрав функцию вида (2):

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

где a, b, c, d, e – начальные значения коэффициентов при k в полиноме; i – номер выбранного АД; k – количества замкнутых витков в месте дефекта.

В результате с помощью ПО *Mathcad* для рассматриваемых АД получены коэффициенты,

позволяющие математически описать полученные зависимости, характеризующие количество замкнутых витков и уровень межвиткового сопротивления в месте дефекта в обмотке (таблица 4).

Результат моделирования с полученными коэффициентами для АД КР71.1/4 представлен на рисунке 5.

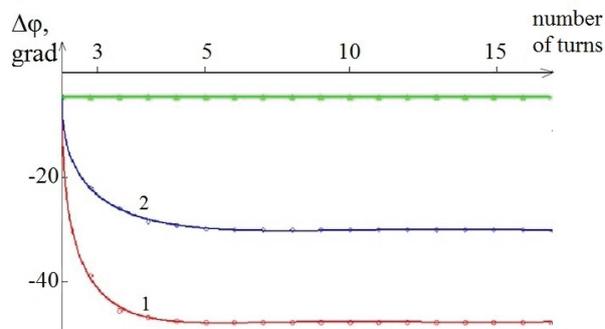


Рисунок 5 – Промоделированные зависимости максимума фазочастотных характеристик от количества замкнутых витков для асинхронного двигателя КР71.1/4. Сопротивление в месте дефекта: 1 – 10 Ом; 2 – 1 кОм; 3 – 10 кОм; Δ, \diamond, \circ – измеренные значения максимума фазочастотных характеристик при соответствующих сопротивлениях в месте дефекта

Figure 5 – The modelled dependencies of the maximum of phase-frequency characteristics on the number of closed turns for the asynchronous engine КР71.1/4. Resistance in the place of the defect: 1 – 10 Ohms; 2 – 1 kOhm; 3 – 10 kOhm; Δ, \diamond, \circ – measured values of the maximum of phase-frequency characteristics with appropriate resistance at the site of the defect

Относительное расхождение полученных математических зависимостей относительно экспериментальных данных в зависимости от количества замкнутых витков для уровня сопротивлений 10 Ом, 1 кОм и 100 кОм для исследуемых двигателей в соответствии с формулой (2) представлены в таблице 5.

Полученные результаты свидетельствуют об общем расхождении математических моделей относительно экспериментальных данных в пределах 1–5 % в зависимости от исследуемых АД и количества дефектных витков в обмотке.

При этом, согласно [1], на уровень максимума фазовых соотношений существенно влияет местоположение замкнутых витков в секциях асинхронных двигателей. Влияние количества замкнутых витков на фазовые соотношения выбранных для анализа различных асинхронных двигателей при уровне межвитковых сопротивлений в 100 кОм, 1 кОм и 10 Ом видно из рисунка 6.

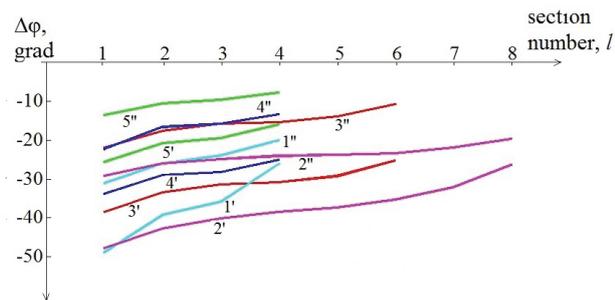


Рисунок 6 – Зависимости величины первого частотного максимума фазовых соотношений от номера дефектной секции для выбранных асинхронных двигателей: 1 – АД АИР63В4У3; 2 – АД КР71.1/4; 3 – АД MOLL Y3-80B4; 4 – АД АО42-6; 5 – АД АО2-32-4; x^1 – сопротивление в месте дефекта 10 Ом; x^{11} – сопротивление в месте дефекта 1 кОм

Figure 6 – Dependence of the first frequency maximum of phase ratios on the number of the defective section for selected asynchronous engines: 1 – AIR-63V4U3; 2 – КР71.1/4; 3 – Moll Y3-80B4; 4 – АО42-6; 5 – АО2-32-4; x^1 – resistance at the site of the defect 10 Ohms; x^{11} – resistance at the site of the defect 1 kOhm

Полученные характеристики позволяют утверждать, что номер секции, где находится место с областью пониженного сопротивления между витками, существенно влияет на величину максимума характеристики, а, следовательно, при проведении диагностики необходимо учитывать данную составляющую для организации алгоритма контроля состояния обмоток.

Поэтому, аналогично предыдущим этапам, сформируем математическую зависимость представленных характеристик и определим переменные полученного полинома. Для уменьшения вычислительных ресурсов в качестве математической функции выберем функцию вида, подобного рассмотренному ранее:

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

где a, b, c, d, e – начальные значения коэффициентов при l в полиноме; i – номер выбранного АД; l – номер катушки с пониженным межвитковым сопротивлением.

Таблица 4/Table 4

Значения коэффициентов в математической зависимости максимума фазочастотных характеристик от количества замкнутых витков для выбранных асинхронных двигателей

The values of coefficients in the mathematical dependence of the maximum phase-frequency characteristics on the number of circuited turns for selected asynchronous motors

Сопротивление в месте дефекта, Ом	Коэффициент	AIR63V4U3	КР71.1/4	MOLL Y3-80B4	АО42-6	АО2-32-4
Resistance at the defect site, Ohm	Coefficient	AIR63V4U3	КР71.1/4	MOLL Y3-80B4	АО42-6	АО2-32-4
10	a	4.679565	-4.45716	-3.065158	-2.940905	1.620899
	b	-79.77453	-55.958986	-52.35338	-41.614735	-30.649486
	c	43.842482	24.952581	26.545301	19.07314	11.82652
	d	-8.540981	-4.080321	-4.850043	-3.180858	-1.619087
	e	0.113051	0.041164	0.058525	0.032874	$9.993472 \cdot 10^{-3}$
1000	a	5.035069	-4.465483	-2.958791	-2.9449	1.567523
	b	-40.92231	-24.517729	-16.403269	-10.662363	-9.450158
	c	15.247007	7.567714	3.724454	0.164337	0.059949
	d	-2.061899	-0.749925	-0.08701	0.651688	0.611122
	e	0.013523	$-7.380024 \cdot 10^{-4}$	$-8.056656 \cdot 10^{-3}$	-0.018396	-0.017127
100000	a	5	-4.5	-3	-3	1,5
	b	$-6.133982 \cdot 10^{-14}$	$5.484502 \cdot 10^{-14}$	$3.591571 \cdot 10^{-14}$	$3.591571 \cdot 10^{-14}$	$-1.795786 \cdot 10^{-14}$
	c	$-5.417888 \cdot 10^{-14}$	$4.723999 \cdot 10^{-14}$	$3.178013 \cdot 10^{-14}$	$3.178013 \cdot 10^{-14}$	$-1.589007 \cdot 10^{-14}$
	d	$4.059253 \cdot 10^{-14}$	$-3.567979 \cdot 10^{-14}$	$-2.396 \cdot 10^{-14}$	$-2.396 \cdot 10^{-14}$	$1.198 \cdot 10^{-14}$
	e	$-1.451313 \cdot 10^{-15}$	$1.284346 \cdot 10^{-15}$	0	0	0

Таблица 5/Table 5

Относительное расхождение математических зависимостей относительно экспериментальных данных в зависимости от количества замкнутых витков

Relative discrepancy between mathematical dependences relative to experimental data depending on the number of circuited turns

Сопротивление в месте дефекта, Ом	Количество замкнутых витков в обмотке	АИР63В4У3	КР71.1/4	MOLL Y3-80B4	АО42-6	АО2-32-4
Resistance at the defect site, Ohm	Number of shorted turns in the windin	AIR63V4U3	KP71.1/4	MOLL Y3-80B4	AO42-6	AO2-32-4
10	1	0.031	0.0095	0.012	0.011	0.013
	3	0.022	0.0011	0.009	0.0063	0.017
	5	0.011	0.008	0.0071	0.0031	0.011
1000	1	0.052	0.015	0.082	0.051	0.041
	3	0.072	0.021	0.022	0.033	0.045
	5	0.031	0.008	0.018	0.0096	0.017
100000	1	0.011	0.008	0.012	0.012	0.011
	3	0.012	0.011	0.009	0.013	0.014
	5	0.011	0.009	0.011	0.01	0.011

В результате с помощью ПО *Mathcad* для рассматриваемых асинхронных двигателей получены коэффициенты, позволяющие математически описать полученные зависимости, характеризующие местоположение замкнутых витков, а также уровень межвиткового

сопротивления в месте дефекта в обмотке (таблица 6).

Результаты моделирования с полученными коэффициентами для АД АИР63В4У3АД (4 обмотки) и КР71.1/4 (8 обмоток) представлены на рисунках 7а и 7б соответственно.

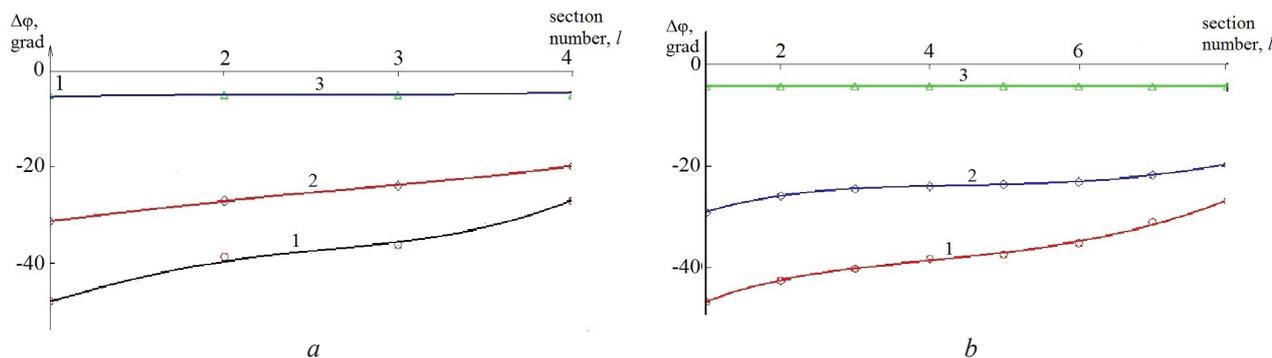


Рисунок 7 – Проомоделированные зависимости максимума фазочастотных характеристик от номера секции с наличием дефекта для рассматриваемых асинхронных двигателей: *a* – асинхронные двигатели АИР63В4У3АД; *b* – асинхронные двигатели КР71.1/4; 1 – сопротивление в месте дефекта 10 Ом; 2 – сопротивление в месте дефекта 1 кОм; 3 – сопротивление в месте дефекта 100 кОм; Δ, ◇, ○ – измеренные показания максимума фазочастотных характеристик при соответствующих сопротивлениях в месте дефекта

Figure 7 – The modelled dependencies of the maximum of phase-frequency characteristics on the section number with a defect for the asynchronous engines considered: *a* – asynchronous engines AIR63V4U3AD; *b* – synchronous engines KP71.1/4; 1 – resistance at the site of the defect 10 Ohms; 2 – resistance at the site of the defect 1 kOhm; 3 – resistance at the site of the defect of 100 kOhm; Δ, ◇, ○ – measured indications of the maximum of phase-frequency characteristics at the corresponding resistances at the site of the defect

Таблица 6/Table 6

Значения коэффициентов в математической зависимости максимума фазочастотных характеристик от номера секции с наличием дефекта для выбранных асинхронных двигателей
The values of the coefficients in the mathematical dependence of the maximum phase-frequency characteristics on the section number with the presence of a defect for selected asynchronous motors

Сопротивление в месте дефекта, Ом Resistance at the defect site, Ohm	Количество закороченных витков в обмотке Number of shorted turns in the windin	АИР63В4У3 AIR63V4U3	КР71.1/4 KP71.1/4	MOLL Y3-80B4 Y3-80B4	АО42-6 AO42-6	АО2-32-4 AO2-32-4
10	1	0.031	0.0095	0.012	0.011	0.013
	3	0.022	0.0011	0.009	0.0063	0.017
	5	0.011	0.008	0.0071	0.0031	0.011
1000	1	0.052	0.015	0.082	0.051	0.041
	3	0.072	0.021	0.022	0.033	0.045
	5	0.031	0.008	0.018	0.0096	0.017
100000	1	0.011	0.008	0.012	0.012	0.011
	3	0.012	0.011	0.009	0.013	0.014
	5	0.011	0.009	0.011	0.01	0.011

При этом относительное расхождение полученных математических зависимостей относительно экспериментальных данных в зависимости от расположения места с областью

пониженного сопротивления между витками для уровня сопротивлений 10 Ом, 1 кОм и 100 кОм для исследуемых двигателей в соответствии с формулой (4) представлены в таблице 7.

Таблица 7/Table 7

Относительное расхождение математических зависимостей относительно экспериментальных данных в зависимости от расположения места с областью пониженного сопротивления

Relative discrepancy between mathematical dependencies relative to experimental data, depending on the location of a place with an area of reduced resistance

Сопротивление в месте дефекта, Ом Resistance at the defect site, Ohm	АИР63В4У3 (номер обмотки) AIR63V4U3 (winding number)	КР71.1/4 (номер обмотки) KP71.1/4 (winding number)	MOLL Y3-80B4 (номер обмотки) MOLL Y3-80B4 (winding number)	АО42-6 (номер обмотки) AO42-6 (winding number)	АО2-32-4 (номер обмотки) AO2-32-4 (winding number)
10	0.017 (1)	0.015 (1)	0.011 (1)	0.013 (1)	0.013 (1)
	0.021 (2)	0.017 (2)	0.017 (2)	0.013 (2)	0.017 (2)
	0.009 (4)	0.0098 (8)	0.0081 (4)	0.0081 (6)	0.011 (4)
1000	0.032 (1)	0.016 (1)	0.092 (1)	0.021 (1)	0.021 (1)
	0.027 (2)	0.018 (2)	0.018 (2)	0.023 (2)	0.015 (2)
	0.019 (4)	0.007 (8)	0.012 (4)	0.0096 (6)	0.017 (4)
100000	0.016 (1)	0.009 (1)	0.011 (1)	0.014 (1)	0.014 (1)
	0.019 (2)	0.013 (2)	0.009 (2)	0.017 (2)	0.016 (2)
	0.011 (4)	0.011 (8)	0.012 (4)	0.013 (4)	0.012 (4)

Как и предыдущие результаты моделирования, сформированные математические зависимости показали расхождение в 1–5 % относительно полученных экспериментальных данных.

Заключение

Разработаны модели оценки ресурса электрических машин с возбуждением резонансных процессов при дефектообразовании в обмотке, в том числе по фазовым соотношениям сигналов. Данные модели обладают точностью, позволяющей обнаружить развитие дефектов. При этом расхождение модели с реальными значениями, полученными при исследовании электрических машин, позволяют с высокой точностью определить характеристики развивающихся дефектов.

Полученные математические модели и коэффициенты для них могут служить основой для построения автоматизированных контрольно-диагностических систем для проверки состояния обмоток электрических машин, в том числе и оценки остаточного ресурса их работы.

Список использованных источников

1. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин: 8-е изд., испр. и доп. / Р.Г. Гемке. – Л.: Энергия, 1995. – 296 с.
2. Черный А.П. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография / А.П. Черный [и др.] // Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
3. Valeria Hrabovcova, Pavol Makyš, Pavol Rafajdus. Analysis of Electrical Machines, IntechOpen is the global imprint of Intechopen Limited. London, United Kingdom, 2020, 202 p.
4. Патент RU2351048C1. Способ функциональной диагностики асинхронных электродвигателей / В.А. Пономарев [и др.]; заявл. 27.03.2009.
5. Патент RU2546827C1. Микроконтроллерное устройство диагностики межвитковой изоляции обмотки электродвигателя / Е.А. Вахтина, Ш.Ж. Габриелян, А.В. Вострухин; заявл. 10.04.2015.
6. Патент RU2428707C1. Микроконтроллерное устройство для диагностики изоляции обмотки асинхронного двигателя / А.В. Вострухин [и др.]; заявл. 10.09.2011.
7. Патент RU2526500. Способ диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов

переменного тока / Ю.Л. Жуковский, С.И. Таранов; заявл. 20.08.2014.

8. Патент RU2537744. Способ диагностирования изоляции обмоток статора асинхронного электродвигателя / И.Ф. Суворов [и др.], 2014.

9. Гуттов И.А. Математические модели для прогнозирования технического состояния изоляции электрооборудования / И.А. Гуттов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 68–75.

10. Метельков В.П. Система оценки остаточного ресурса изоляции обмотки асинхронного двигателя на основе емкостных токов утечки / В.П. Метельков, А.М. Зюзев, И.В. Черных // Мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 2011. – № 2. – С. 34–47.

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. Patent US20090224707A1. Connel Brett Williams, Christopher David Dixon, Electric Motor Control, 2009.

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

15. Патент ВУ16628. Способ контроля витковой изоляции обмотки якоря электрической машины / Ю.В. Суходолов [и др.]; заявл. 27.08.2012.

16. Суходолов Ю.В. Возможность определения дефектов в обмотках электрических машин частотными методами / Ю.В. Суходолов [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 3. – С. 10–17.

References

1. 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.
2. Cherny A.P., Rodkin D.I., Kalinov A.P., Vorobeichik O.S. *Monitoring parametrov elektricheskikh dvigateley elektromekhanicheskikh sistem: Monografiya* [Monitoring of parameters of electric motors of electro-mechanical systems: Monograph]. Kremenchug: ChP Shcherbatykh A.V. Publ., 2008, 246 p.
3. Valeria Hrabovcova, Pavol Makyš, Pavol Rafajdus. Analysis of Electrical Machines, IntechOpen is the

global imprint of Intechopen Limited, London, United Kingdom, 2020, 202 p.

4. Ponomarev V.A., Suvorov I.F., Yudin A.S., Portnyagin A.V., *Sposob funktsional'noy diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateley* [A method of functional diagnosis of asynchronous electric motors]. Patent RF, no. 2351048C1, 2009.

5. Vakhtina Ye.A., Gabrielyan SH.ZH., Vostrukhin A.V. *Mikrokontrollernoye ustroystvo diagnostiki mezhvitkovoy izolyatsii obmotki elektrodvigateleya* [Microcontroller diagnostic device for interitic isolation of the electric motor winding]. Patent RF, no. 2546827C1, 2015.

6. Vostrukhin A.V., Danilov K.P., Vakhtina Ye.A., Dorozhko S.V. *Mikrokontrollernoye ustroystvo dlya diagnostiki izolyatsii obmotki asinkhronnogo dvigatelya* [Microcontroller for diagnosing the isolation of the asynchronous engine winding]. Patent RF, no. 2428707C1, 2011.

7. 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, 2014.

8. Suvorov I.F., Gorbunov R.V., Palkin G.A., Koryakov D.V. *Sposob diagnostirovaniya izolyatsii obmotok statora asinkhronnogo elektrodvigateleya* [Method of diagnosing insulation of windings of the stator of asynchronous electric motor]. Patent RF, no. 2537744C1, 2014.

9. Gutov I.A. *Matematicheskiye modeli dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya izolyatsii elektrooborudovaniya* [Mathematical models for predicting the technical condition of electrical equipment insulation]. *Polzunovskiy vestnik* [Volga bulletin], 2009, no. 4, pp. 68–75 (in Russian).

10. Metelkov V.P., Zyuzev A.M., Chernykh I.V. *Sistema otsenki ostatochnogo resursa izolyatsii obmotki asinkhronnogo dvigatelya na osnove emkostnykh tokov utechki* [The system for estimating the residual life of the

insulation of the winding of an asynchronous motor based on capacitive leakage currents]. *Monitoring, kontrol' i diagnostika elektrooborudovaniya, Ural'skiy federal'nyy universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Yel'tsina* [Monitoring, control and diagnostics of electrical equipment, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin], 2011, no. 2, pp. 34–47 (in Russian).

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, 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. Connel Brett Williams, Christopher David Dixon, Electric Motor Control. Patent US20090224707A1, 2009.

14. Sukhodolov YU.V., Belousov A.V., Kruchenok L.P. *Sposob kompleksnogo kontrolya trekhfaznoy elektricheskoy mashiny* [A method of comprehensive control of a three-phase electric machine]. Patent BY, no. 20042, 2012.

15. Sukhodolov YU.V., Sheynikov A.A., Malashin A.N., Vashkevich V.R. *Sposob kontrolya vitkovoy izolyatsii obmotki yakorya elektricheskoy mashiny* [A way of monitoring the winding insulation of the winding of the electric machine.]. Patent BY, no. 16628, 2012.

16. 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 (in Russian).