$$\tau_d = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/V_x). \quad (24)$$

Из (21) имеем:

$$V_x = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/\tau_d. \quad (25)$$

Уравнения (21) и (25) инвариантны друг к другу, т. е.

$$2H(k_1 - k_2)/\Delta\tau = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/\tau_d \quad (26)$$

Из (26) получаем уравнение для определения высоты полета H виде

$$H = d_0\Delta\tau/[(2\tau_d - \Delta\tau)(k_1 - k_2)]. \quad (27)$$

Уравнение для определения скорости полета V_x получено из (25) с учетом (27)

$$V_x = 2d_0/(2\tau_d - \Delta\tau). \quad (28)$$

Как следует из уравнений (27, 28) метод обеспечивает одновременное определение высоты H и путевой скорости V_x БПЛА при полете над ПП с с неоднородной яркостной сигнатурой. Особые преимущества метода проявляются вусловиях квазигоризонтальных маловысотных полетов со скоростью до 300 км/ч в диапазоне высот до 250–300 м, что актуально для контроля сближения БПЛА с заданными объектами на ПП, автоматизированной посадки, осуществления полетов с огибанием рельефаместности на предельно малых высотах до 0,2 ÷0,5 м [4].

Литература

1. Гурлев, Д. С. Справочник по фотографии (фотосьемка) / Д. С. Гурлев. – Киев: Техника, 1989. – 305 с.

2. Тимофеев, Ю. М. Основы теоретической атмосферной оптики / Ю. М. Тимофеев, А. В. Васильев. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2007. – 338 с.

3. Иванов, В. И. Методология и алгоритмы получения 3D-портретов объектов по 2D-распределениям интенсивности усеченных реализаций отраженного лазерного излучения / В. И. Иванов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 386–396.

4. Иванов, В. И. Метод определения высоты и скорости полета беспилотного летательного аппарата по яркостной сигнатуре подстилающей поверхности / В. И. Иванов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2025. – Т. 92, № 5. – С. 607–617.

УДК 621.313

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Исаев А. В., Суходолов Ю. В., Лычковский В. А., Кротова А. С., Леонович П. Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Проблема оценки работоспособности электромеханических приводов является актуальной с самого зарождения станко- и приборостроения. Целью данной работы было разработка метода, построение алгоритма и изготовление на их основе прибора, который сможет на основе спектральных составляющих тока, протекающего в обмотках электрической машины, работающего в режиме «холостого хода» контролировать его состояние с возможностью своевременного выявления дефектообразования.

Ключевые слова: диагностика электрических машин, методы оценки состояния электрических машин, спектральный состав тока холостого хода, сопротивление межвитковой изоляции обмоток.

USING NO-LOAD CURRENT TO ASSESS THE CONDITION OF ELECTRIC MACHINE WINDINGS

Isaev A. V., Sukhodolov Yu. V., Lychkovsky V. A., Krotova A. S., Leonovich P. D.

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Abstract. The problem of assessing the performance of electromechanical drives has been relevant since the very inception of machine-tool and instrument-making. The purpose of this work was to develop a method, build an algorithm and manufacture a device based on them that will be able to monitor the state of an electric machine with the ability to promptly detect defects based on the spectral components of the current flowing in the windings of an electric machine operating in the "idle" mode.

Keywords: diagnostics of electrical machines, methods for assessing the condition of electrical machines, spectral composition of no-load current, resistance of interturn insulation of windings.

Адрес для переписки: Исаев А. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaevav@bntu.by

Проблема оценки работоспособности электромеханических приводов была актуальна с самого зарождения станко- и приборостроения. При этом данная проблема до конца не решена и в настоящее время. А с учетом увеличения требований к такому оборудованию, существенному повышению эксплуатационных характеристик, эта проблема стала еще более критичной. В настоящее время разработано большое количество методов, в той или иной мере позволяющие оценить состояние электрических цепей электроприводов, но все они мало пригодны для использования в реальных условиях [1, 2]. Да и фиксируют они проблему уже на конечных стадиях дефектообразования, когда говорить о работоспособности, а тем более об исправности такого диагностируемого оборудования не приходится. Поэтому работы по разработкам методов и алгоритмов контроля состояния электрических машин,

можно сказать, не прекращаются ни на минуту. Одним из способов решить поставленную задачу является метод контроля и анализа спектральных составляющих тока холостого хода при работе электрических машин без наличия выходной нагрузки [3]. Этот метод не является новым. И особенности изменения параметров тока, протекающего в обмотках, например трехфазных двигателей, в зависимости от состояния самих обмоток исследовались достаточно серьезно. Однако все исследования остановились только на факте, что «да», влияют. Но как, по каким закономерностям и при каких условиях, а самое главное – как использовать это для диагностики электрооборудования, ответа так и не было дано. Поэтому целью данной исследовательской работы было разработка метода, построение алгоритма и изготовление на их основе прибора, который сможет контролировать состояние электрических машин непосредственно в рабочих циклах их эксплуатации с возможностью своевременного выявления дефектообразования [4]. На рисунке 1 приставлены осциллограммы тока работающего двигателя при равных условиях, но на в первом случае с исправными обмотками, а во втором при наличии дефекта в межвитковой изоляции на уровне 100 Ом (т.е. когда двигатель еще в какой-то мере работоспособен, но уже не исправен).

В этом случае даже «на глаз» отслеживается отличие зависимостей. Однако, оценка спектральных составляющих представленных кривых показывает на сколько существенны эти отличия (рисунок 2). При этом, как показали эксперименты, наиболее информативными параметрами могут являться уровень (т. е. суммарная амплитуда) высших спектральных составляющих (т. е. результирующей кривой тока холостого хода, полученной путем сложения высших спектральных составляющих) и изменение (сдвиг) фазы первой спектральной составляющей относительно входного напряжения и (или) суммы высших спектральных составляющих.

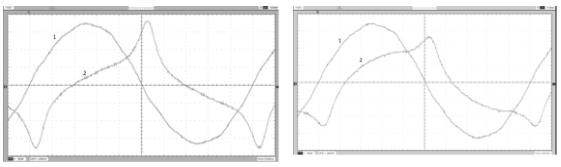
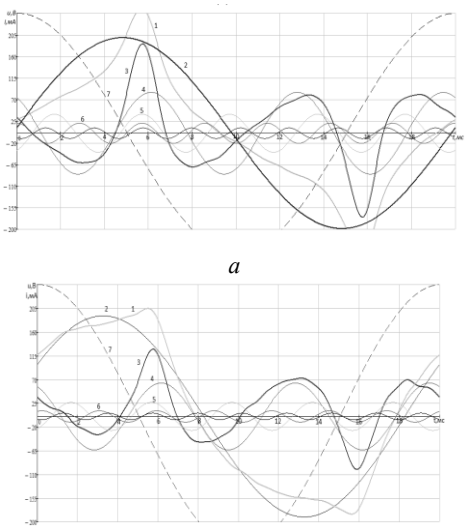


Рисунок 1 – Осцилограмм тока холостого хода при различных состояниях обмотки

Однако изменения амплитуды характеризуются невысокой точностью измерений при стандартных, т. е. производственных условиях. Это связано как с нестабильностью параметров исходного сигнала (нестабильность сетевого напряжения по амплитуде, наличие высших гармоник и т. д.), так и с сильным влиянием на параметры самого измерительного сигнала помех от диагностируемого мощного электромагнитного оборудования.

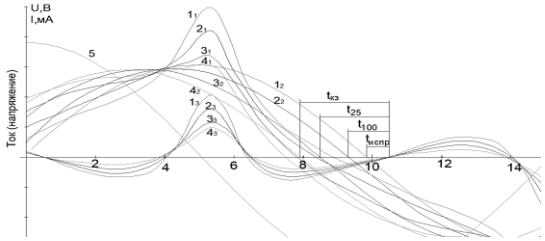


а

б

1 – общая кривая тока холостого тока; 2 – кривая первой гармоники; 3 – суммарная кривая тока высших гармоник; 4 – кривая третьей гармоники; 5 – кривая пятой гармоники; 6 – кривая седьмой гармоники; 7 – кривая фазного напряжения; *а* – исправное состояние обмотки; *б* – при витковом замыкании через сопротивление 10 Ом

Рисунок 2 – Спектральный состав тока холостого тока



x^1 – суммарная кривая тока ХХ; x^2 - кривая первой спектральной составляющей тока ХХ; x^3 – кривая суммы высших спектральных составляющих тока ХХ; *1* – исправного; *2* – при межвитковом сопротивлении 100 Ом; *3* – при межвитковом сопротивлении 25 Ом; *4* – с КЗ витками

Рисунок 3 – Кривые тока ХХ обмоток исследуемого электродвигателя

Поэтому, как наиболее оптимальным измерительным параметром, было выбрано изменение фазы. Дальнейшая исследования и анализ полученных кривых тока холостого хода показали, что наиболее информативным параметром является взаимное расположение на временной оси точек перехода через ноль первой спектральной составляющей и точек перехода через ноль результирующей кривой, полученной путем сложения высших спектральных составляющих. При этом наиболее целесообразно использовать для анализа временной интервал между переходом первой спектральной составляющей из положительной в отрицательную

область, и следующим после зафиксированной первой характерной точки переходом через ноль из отрицательной в положительную результирующей кривой, полученной путем сложения высших спектральных составляющих (т.е. ближайшая к $t = T/2$) (рисунок 3).

Литература

1. Современные методы оценки состояния обмоток электрических машин / Ю. В. Суходолов [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2025. – № 2. – С. 49–59.

2. Дайнеко, В. А. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения / В. А. Дайнеко, Ж. Г. Юрковец // Агропанорама. – 2021. – № 4 (146). – С. 22–25.

3. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя: введ. 11.01.2016. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

4. Исаев, А. В. Определение дефектов обмоток электрических машин по параметрам спектра тока холостого хода / А. В. Исаев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 1. – С. 17–21.

УДК 681.783

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОЭФФЕКТА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ОБЪЕКТОВ И РАССТОЯНИЯ ДО НИХ

Калинов В. С.[1], Козлов В. Л.[2], Яковлев Д. Л.[1]

[1]ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»
[2]Факультет радиофизики и компьютерных технологий БГУ
Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются теоретические принципы и практическая реализация системы машинного зрения на базе цифровой стереокамеры, предназначенной для дистанционного измерения пространственных координат и размеров предметов, не требующая применения мерных объектов в поле зрения. Приведена методика калибровки системы и данные по точности измерений.

Ключевые слова: машинное зрение, стереоизображение, диспарантность, цифровая фотосъемка, корреляционная обработка.

PRACTICAL APPLICATION OF THE STEREO EFFECT FOR REMOTE DETERMINATION OF THE SIZE OF OBJECTS AND THE DISTANCE TO THEM

Kalinov V. S.[1], Kozlov V. L.[2], Yakovlev D. L[1].

[1]Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
[2]Faculty of Radiophysics and Computer Technologies of the Belarusian State University
Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the theoretical principles and the practical implementation of a machine vision system based on a digital stereo camera for remote measurement of spatial coordinates and object sizes without the need for reference objects in the field of view. A system calibration methodology and measurement accuracy data are provided.

Keywords: machine vision, stereo imaging, disparity, digital photography, correlation processing.

Адрес для переписки: Калинов В. С., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: v.kalinov@ifanbel.bas-net.by

Задачи измерения расстояний до объектов на местности и определения размеров этих объектов в архитектуре и строительстве, геодезии и картографии, метрологии, криминалистке и других областях деятельности традиционно решались с помощью устройств типа линеек и рулеток, что создавало известные сложности при работе с габаритными и труднодостижимыми объектами.

Такие современные измерительные средства, как лазерные дальномеры или лидары, позволяют определить расстояние до удаленных предметов, но для получения линейных размеров этих предметов приходится прибегать к сложным техникам измерения, например, триангуляции, при этом в случае возникновения необходимости уточнения измерений или определения дополнительных размеров нужен повторный выезд на место, что не всегда удобно, а в случае, например, осмотра места происшествия – и не всегда возможно.

При необходимости получения большого массива измерительной информации с возможностью фиксации подробностей (даже не представляющих интерес на текущий момент) часто используют фотограмметрию, что требует проведения трудоемкой обработки нескольких фотографий анализируемого трехмерного объекта, полученных с разных ракурсов съемки.

В настоящем сообщении мы предлагаем измерительный прибор на основе цифровой стереофотокамеры, позволяющий дистанционно определять размеры объектов и расстояния до них без применения эталонных мерных объектов в поле зрения по сохраненной стереофотографии. Принципиальная схема разработанной системы [1] представлена на рисунке 1.

Два объектива *3* (рисунок 1) с фокусными расстояниями *f* проецируют изображение измеряемого объекта *1* на плоскости фотоприемных матриц *4*. Оптические оси объективов параллельны и