



Применение микропроцессорного блока релейной защиты для диагностирования внутренних повреждений электрооборудования электроустановок

Д.М. Баннов^{1✉}, В.И. Полищук²

¹Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

²Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

Резюме. Цель – определить применимость стандартных микропроцессорных блоков релейной защиты и автоматики к получению цифрового сигнала токов для их математической обработки в вопросах диагностирования внутренних повреждений электрооборудования. В работе использовалась математическая обработка экспериментальных данных (временных рядов), основанная на аппроксимации регрессионным анализом в ортогональном базисе. При этом сравнивались весовые коэффициенты при базисных функциях в понимании векторов многомерного пространства, координатами которого они являлись, полученные по методу наименьших квадратов. В роли исследуемого сигнала выступает группа данных, полученных от натурных экспериментов, проводимых с асинхронным двигателем, в котором имеется возможность создания искусственного внутреннего повреждения. Экспериментальные данные были получены на двух устройствах с разной частотой дискретизации и уровнем квантования. Первая группа данных получена на 12-тибитной PCI плате аналого-цифрового преобразователя для установки в персональный компьютер National Instruments 6024E при частоте дискретизации 10 кГц, вторая группа – на стандартизированном блоке микропроцессорной релейной защиты и автоматики при частоте дискретизации 2,4 кГц. Были получены критерии наличия внутреннего повреждения роторной цепи асинхронного двигателя, которое заметно не влияет на его работу, но снижает его энергетические характеристики, отличающиеся от неповрежденного состояния в 5 раз. Установлено, что предложенный способ выделения диагностического признака внутреннего повреждения электрооборудования электроустановок позволяет обнаружить изменение их электрических параметров на 3% от нормального состояния, не реагируя при этом на наличие электрической/механической нагрузки. Показано, что поведение диагностического признака оказалось одинаково свойственно при наличии внутреннего повреждения как при исследовании первой группы сигналов, так и при исследовании второй группы. Таким образом, подтверждена возможность получения цифрового сигнала от стандартизированных блоков релейной защиты приемлемой точности для обеспечения чувствительности диагностирования внутреннего повреждения электрооборудования электроустановок.

Ключевые слова: диагностика электрооборудования, обработка экспериментальных данных, метод регрессионного анализа, базисные функции

Для цитирования: Баннов Д.М., Полищук В.И. Применение микропроцессорного блока релейной защиты для диагностирования внутренних повреждений электрооборудования электроустановок // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 521–533. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-521-533>. EDN: WYCDQM.

POWER ENGINEERING

Original article

Application of a microprocessor-based relay protection unit for identifying internal faults of electrical equipment of electrical installations

Dmitry M. Bannov^{1✉}, Vladimir I. Polishchuk²

¹Samara State Technical University, Samara, Russia

²Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Abstract. We aim to determine the applicability of standard microprocessor units of relay protection and automation for obtaining a digital signal of currents for their subsequent mathematical processing with the purpose

of identifying internal faults of electrical equipment. Mathematical processing of experimental data (time series) based on regression analysis approximation in orthogonal basis was carried out. To that end, the weight coefficients of basis functions obtained by the least squares method were compared in terms of multidimensional space vectors, corresponding to the coordinates of this space. The investigated signal was a data set obtained by field experiments conducted with an induction motor, which assumed the possibility of creating artificial internal damage. Experimental data were obtained using two devices with different sampling rates and quantization levels. The first set of data was obtained using a 12-bit PCI board of analog-to-digital converter for installation in a National Instruments 6024E PC at a sampling rate of 10 kHz. The second set of data was obtained using a standard block of microprocessor relay protection and automation at a sampling rate of 2.4 kHz. Indicators for the presence of internal damage to the rotor circuit of an induction motor, which reduces the motor energy characteristics without affecting its operation significantly, were determined. The indicators of the damaged and undamaged state differed by a factor of five. The proposed method for selecting the diagnostic sign of internal damage of electrical equipment of electrical installations detects a 3% deviation in their parameters from the normal state, ignoring the presence of electrical/mechanical load. The diagnostic sign was established to behave similarly in the presence of internal damage, in both sets of signals under study. Thus, the possibility of obtaining a digital signal of acceptable accuracy from standard relay protection units for ensuring reliable identification of internal faults of electrical equipment of electrical installations is confirmed.

Keywords: electrical equipment diagnostics, experimental data processing, regression analysis method, basis functions

For citation: Bannov D.M., Polishchuk V.I. Application of a microprocessor-based relay protection unit for identifying internal faults of electrical equipment of electrical installations. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):521-533. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-521-533>. EDN: WYCDQM.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов обработки сигналов для мониторинга и диагностики состояния электрооборудования электроустановок является актуальной задачей для всех отраслей промышленности. Эффективная система диагностики на ранней стадии развития дефекта, базируемая на штатных средствах релейной защиты и автоматики, является основой для реализации программы по переходу с планово-предупредительных ремонтов на ремонты по результатам диагностики. Своевременная диагностика электрооборудования значительно снижает количество аварий на промышленных объектах [1]. С растущим уровнем автоматизации объектов электроэнергетики растет и потребность в расширении способов и методов обработки информационных сигналов.

Современные штатные устройства релейной защиты предоставляют уникальную возможность по интеграции алгоритмов в базовое программное обеспечение микропроцессорных блоков релейной защиты и автоматики (МБРЗА).

МБРЗА является электронно-вычислительной машиной, работающей на такой же топологии схемы компоновки, как и у персонального компьютера, и имеет схожий набор главных ее элементов (постоянное запоминающее устройство, оперативное запоминающее устройство, процессор, дискретные входы/выходы и др.). Не секрет, что МБРЗА

в режиме непрерывной работы загружен не на полную вычислительную мощность. Для реализации возможности непрерывного анализа сигналов штатными микропроцессорными устройствами возникает необходимость определения чувствительности существующих устройств аналого-цифрового преобразования (АЦП) к исследуемым изменениям сигналов от разных состояний электрооборудования. Поскольку наиболее перспективным способом диагностирования электрооборудования является анализ токов [2–8], разработка новых методов и внедрение в существующие устройства именно его является актуальной задачей как за рубежом, так и среди отечественных исследователей [9, 10].

В данной работе авторами предлагается апробировать штатное устройство МБРЗА на предмет его применимости к получению и дальнейшей математической обработки диагностических цифровых сигналов.

Представлена лабораторная установка, на которой реализован принцип физического моделирования внутреннего повреждения, представленного в виде обрыва стержня роторной цепи асинхронного двигателя, с возможностью восстановления в исходное состояние и имитации нагрузки на валу. В статье проведено сопоставление применения разработанного авторами метода математической обработки цифрового сигнала токов трехфазной цепи асинхронного двига-

теля, полученных при частоте дискретизации 10 кГц от лабораторного устройства и частоте дискретизации 2,4 кГц от типового МБРЗА.

Представлен диагностический признак, характеризующий наличие внутреннего повреждения (обрыва стержня) электрооборудования (асинхронного двигателя), полученный разработанным методом, показывающий свою работоспособность при использовании стандартного микропроцессорного блока релейной защиты. Предполагается, что фактическую реализацию новых методов в программном обеспечении МБРЗА возможно осуществить, применяя стандартные операторы того языка программирования, который реализован при составлении программного обеспечения используемого блока.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести натурный эксперимент на примере асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, имеющим возможность создавать внутреннее повреждение обмотки ротора. Режимы, в которых исследуется экспериментальный двигатель, должны соответствовать режимам работы реальных машин, находящихся в эксплуатации, таких как пусковой режим, режим холостого хода, установившийся режим нагрузки.

Получить цифровой сигнал токов во всех режимах работы и с наличием внутреннего повреждения от источников с разными характеристиками АЦП, на основе которого реализовать метод математической обработки для выявления диагностического признака наличия внутреннего повреждения.

Апробировать разработанный метод диагностирования внутренних повреждений на цифровых сигналах, полученных от разных АЦП с разной частотой дискретизации и уровнем квантования, и определить возможность его применения в стандартизированных устройствах автоматики и релейной защиты.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения работы и достижения поставленной цели авторами были решены следующие задачи:

- создана экспериментальная установка, отвечающая требованиям проведения натурального эксперимента, с наличием вну-

тренного повреждения, а также с возможностью восстановления машины в исходное состояние для обеспечения повторяемости эксперимента;

- получен адекватный цифровой сигнал фазных токов исследуемого электрооборудования на экспериментальной установке от разных устройств (от лабораторного 12-битного АЦП с частотой дискретизации 10 кГц и от штатного МБРЗА с частотой дискретизации 2,4 кГц);

- апробирован на лабораторном устройстве и на МБРЗА разработанный метод математической обработки полученных экспериментальных данных на основе существующих в большинстве языков программирования способов аппроксимации с целью выделения диагностического признака и сравнения разных состояний электрооборудования.

Решение первой задачи представляет собой соосную спарку из двух асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором, номинальной мощностью 3 кВт, один из которых применяется в качестве устройства, создающего тормозящий момент в режиме электродинамического тормоза, другой – испытуемый АД, в котором созданы условия внутреннего повреждения роторной цепи таким образом, чтобы можно было регулировать степень повреждения и восстанавливать ее в исходное неповрежденное состояние. Экспериментальная установка схематически и натурно представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что на зажимы одного АД подается постоянный ток, что переводит его в режим электродинамического торможения, обеспечивая тем самым стабильность и равномерность тормозного момента, а также его одинаковость во всех экспериментах.

Для реализации повторяемости эксперимента был спроектирован и создан магнитопровод, конструктивно повторяющий магнитопровод заводского исполнения (количество стержней «беличьей клетки», наличие скоса пазов, диаметр, длина), в котором была реализована короткозамкнутая обмотка из медных проводников и короткозамыкающих колец, соединяемых методом пайки [11]. Данная конструкция была установлена на вал испытуемого АД вместо заводской активной части ротора (рис. 2).

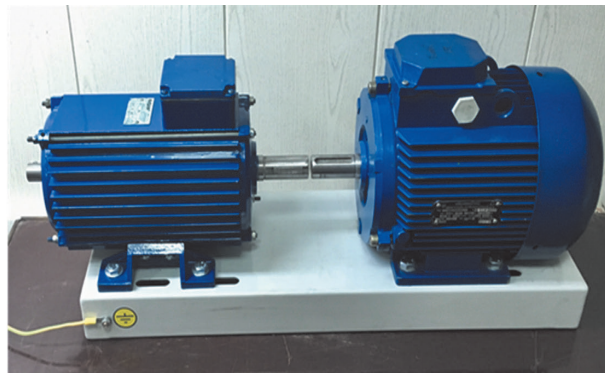
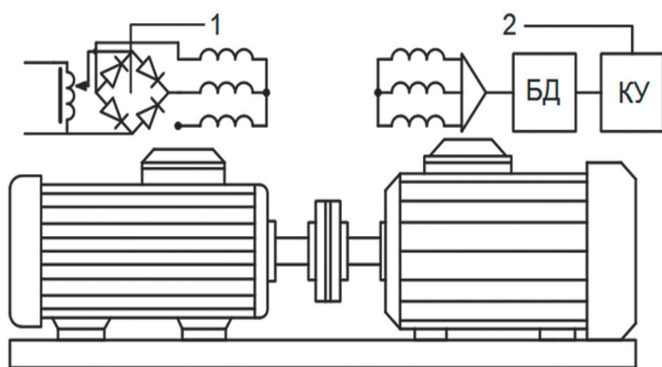


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – выпрямительный агрегат, питаемый от сети 220 В; 2 – трехфазная сеть, подключаемая к асинхронному двигателю через коммутационное устройство (КУ) и блок датчиков (БД)

Fig. 1. Experimental setup: 1 – 220V rectifier unit; 2 – three-phase network connected to the induction motor via a switching device (КУ) and a sensor unit (БД)

Из рис. 2 становится понятно, что внутреннее повреждение роторной цепи обеспечивается созданием физического разрыва между стержнем ротора и короткозамыкающим кольцом. При этом имеется возможность регулировать степень повреждения, отпаивая как один стержень, так и сразу несколько. Также очевидно, что данную конструкцию возможно восстановить в свое исходное состояние и многократно повторить эксперимент для того, чтобы убедиться в его адекватности.

Решением второй задачи является интеграция экспериментальной установки в си-

стему сбора данных, реализованную на базе персонального компьютера с платой АЦП National Instruments PSI 6024E. Источником эквивалентно-преобразованного сигнала токов статорной обмотки при этом являлись датчики Холла LEM HY 05 ... 25P, обеспечивающие гальваническую развязку между первичной токовой цепью и вторичной цепью измерения. Взаимодействие с данной системой происходит через программный пакет LabVIEW посредством виртуальных приборов. Панель виртуальных приборов представлена на рис. 3.

На рис. 3 представлена схема движения сигналов напряжения и фазного тока трех фаз испытуемого АД. Из него видно, что ток фаз А, В и С в процессе получения проходит ряд математических преобразований, таких как умножение на самого себя (возведение в квадрат), сложение и извлечение корня. Данные действия позволяют вместе с синусоидальными кривыми токов фаз получить модуль результирующего вектора токов статора по формуле (1). Сигналы напряжений в данном исследовании не применялись.

$$i_m(n) = \sqrt{i_A(n)^2 + i_B(n)^2 + i_C(n)^2}, \quad (1)$$

где i_A, i_B, i_C – мгновенные значения фазных токов, о.е.; n – номер отсчета.

Для апробации разработанного метода на сигналах, полученных от АЦП штатного МБРЗА к экспериментальной установке, последовательно питающей трехфазной сети, был подключен блок в составе лабораторного стенда (рис. 4).



Рис. 2. Ротор экспериментального асинхронного двигателя
Fig. 2. Rotor of an experimental induction motor

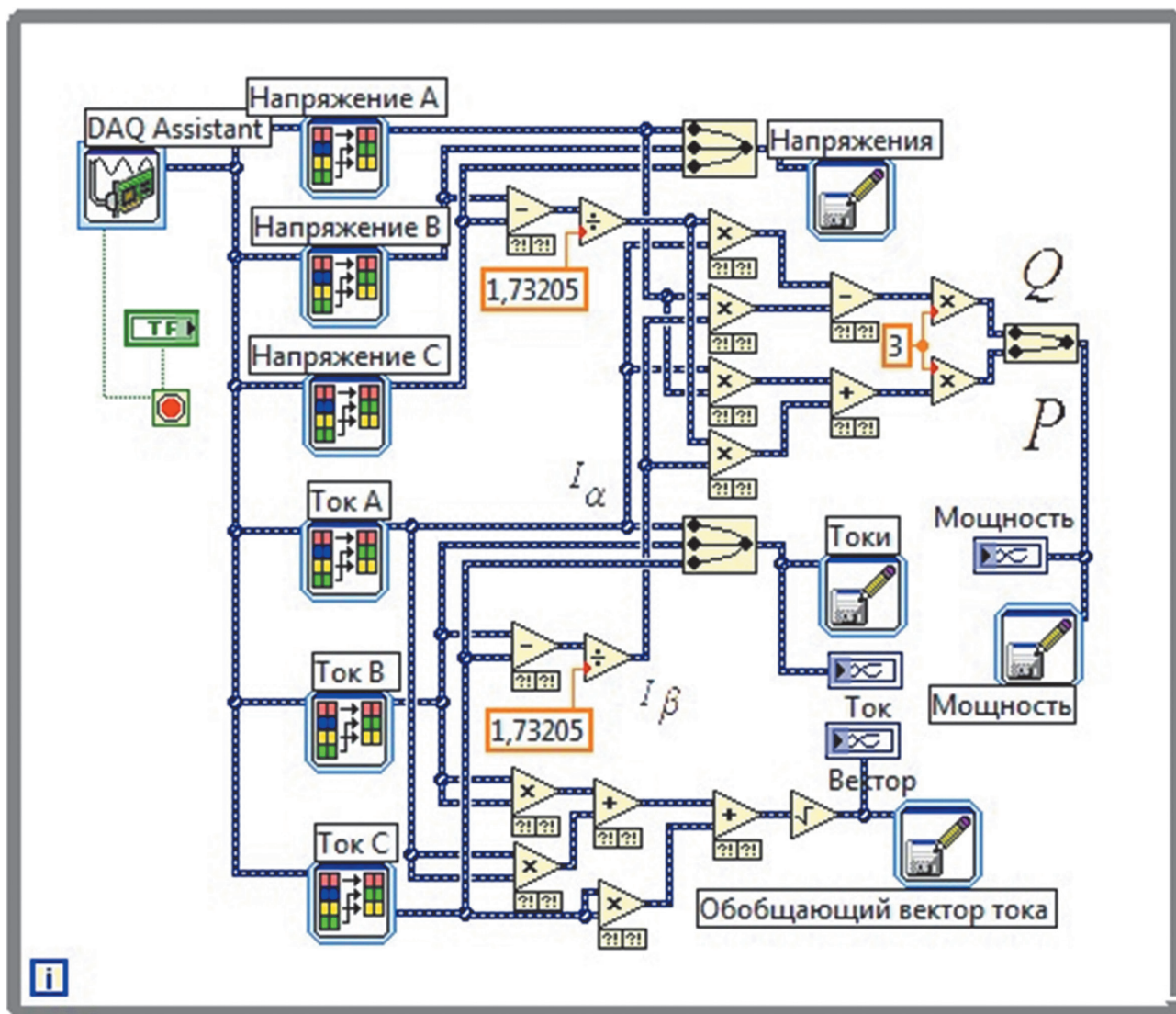


Рис. 3. Панель виртуальных приборов в LabView
 Fig. 3. LabView virtual instruments panel

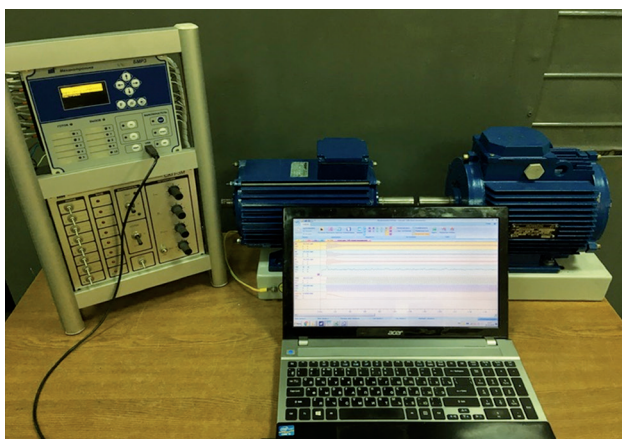


Рис. 4. Экспериментальная установка при получении сигнала токов статора от стандартизированного микропроцессорного блока релейной защиты и автоматики
 Fig. 4. Experimental setup when receiving a stator current signal from the standardized microprocessor relay protection and automation unit

Согласно техническим характеристикам (табл. 1), к токовым цепям используемого микропроцессорного блока имеется возможность подключить силовую линию, питающую АД, напрямую, не применяя дополнительных трансформаторов тока. Взаимодействие штатного МБРЗА с персональным компьютером происходит через специализированное штатное программное обеспечение со свободным доступом.

Исходя из характеристик, представленных производителем в табл. 1, авторами сделан вывод, что к токовым цепям для целей исследования можно подключать токовые цепи высоковольтных трансформаторов тока от 0 до 5 А. Потребляемый ток АД экспериментальной установки согласно паспортным данным – 7 А, что для данного МБРЗА

Таблица 1. Характеристики аналоговых входов используемого МБРЗА^{3,4}**Table 1.** Characteristics of analogue inputs of the used microprocessor relay protection and automation unit^{3,4}

Наименование сигнала	Диапазон значений	Обозначение
Фазный ток	от 0,25 до 250,00 А	$I_{A,B,C}$
Ток нулевой последовательности	от 0,004 до 4,00 А	$3I_0$
Линейное напряжение фаз А, В и С от трансформатора напряжения (ТН)	от 2 до 260,00 В	$U_{AB,BC,CA}$
Напряжение нулевой последовательности от ТН	от 2 до 260,00 В	$3U_0$

является значением с большим запасом, учитывая пусковые токи.

На рис. 5 представлен сигнал фазных токов статорной цепи, полученный от штатного МБРЗА при частоте дискретизации 2,4 кГц.

На рис. 5 помимо фазных токов в режиме пуска и холостого хода представлен также сигнал модуля результирующего вектора токов I_m , рассчитанный по (1) в специализи-

рованном штатном программном обеспечении.

Методом математической обработки получаемых сигналов является регрессионный анализ, представленный во всех языках программирования в виде готовых математических операторов. Обработке подвергались фрагменты сигналов холостого хода различного количества отсчетов n по следующей формуле⁵ [13]:

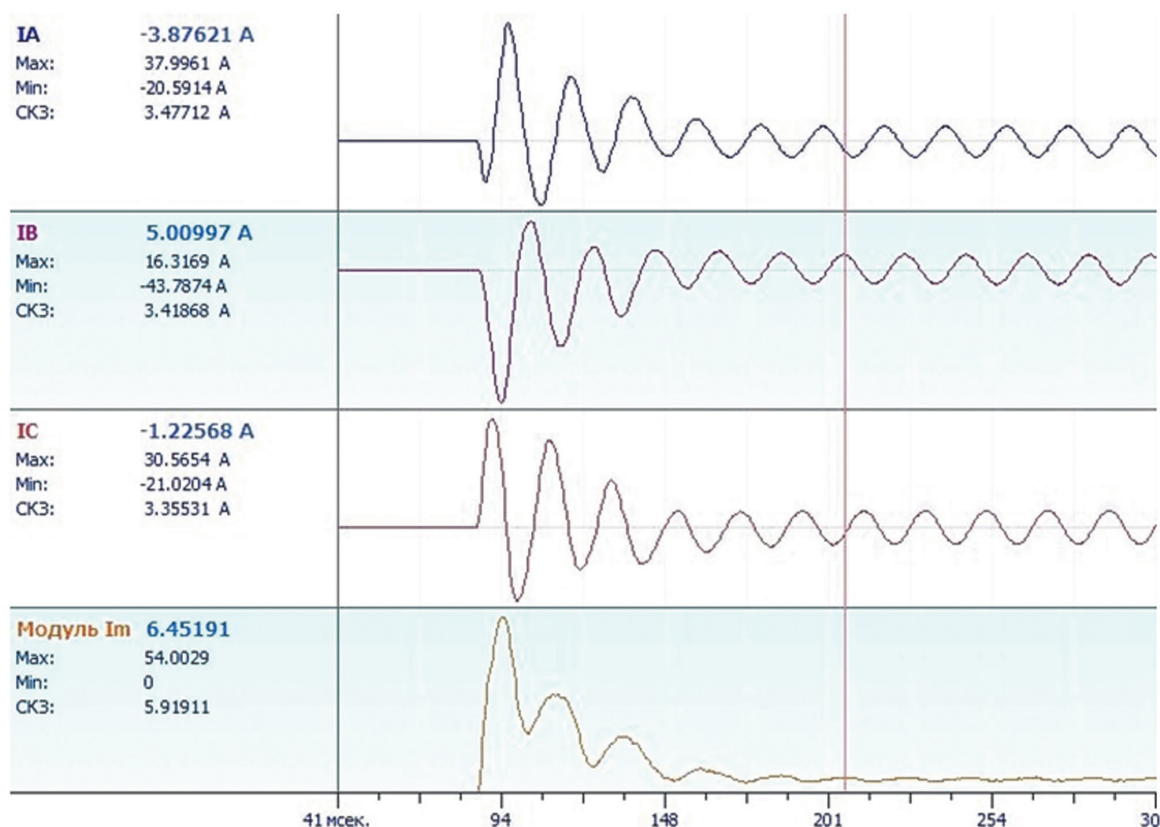


Рис. 5. Сигналы фазных токов испытуемого асинхронного двигателя, полученные штатным микропроцессорным блоком релейной защиты и автоматики и рассчитанный по (1) сигнал модуля результирующего вектора токов

Fig. 5. Phase current signals of the tested induction motor received by the standard microprocessor relay protection and automation unit and calculated according to the resultant current vector modulus signal (1)

³Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-152-КЛ-53. Режим доступа: <https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-150/bmrz-152-kl-53.pdf> (дата обращения: 02.05.2024).

⁴Бушнев Д.В., Романов А.В. Теоретические основы цифровой обработки сигналов: учеб. пособ. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. 116 с.

⁵Вадутов О.С. Математические основы обработки сигналов: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2024. 307 с.

$$\begin{aligned} \varphi(n) = & A_0 + A_1 \cos(\omega n k_1) + B_1 \sin(\omega n k_1) + \dots \\ & \dots + A_N \cos(\omega n k_N) + B_N \sin(\omega n k_N) \end{aligned} \quad , (2)$$

где A и B – весовые коэффициенты при базисных функциях; N – количество базисных функций; k – параметр, определяющий количество гармонических составляющих аппроксимационной модели.

Как видно из формулы (2), в качестве базисных функций выбран характерный для гармонического сигнала Фурье базис⁶ [14], что позволяет использовать свойство ортогональности косинуса и синуса для представления получаемых по методу наименьших квадратов весовых коэффициентов в качестве координат вектора.

Благодаря регрессии можно количественно и качественно анализировать изучаемые явления в сигналах и проводить их сравнение [15–17]. Поэтому дальнейшие математические операции с ними для определения разницы сигналов разного состояния можно производить по законам векторной алгебры⁷ [18].

Чтобы сравнивать получаемые вектора весовых коэффициентов и выделять диагностический признак, авторами было введено несколько понятий: вектор неповрежденного состояния (с заведомо неповрежденным ротором) $\mathbf{h}_1$; вектор неповрежденного состояния $\mathbf{h}_2$, аналогичный вектору неповрежденного состояния $\mathbf{h}_1$, но полученный при обработке другого участка сигнала; вектор поврежденных состояний (один, два, три, четыре обрыва стержня) $\mathbf{d}_{1...4}$; вектор-разница $\mathbf{l}_{0...4}$, получаемый векторным вычитанием двух сравниваемых векторов $\mathbf{h}_1$ и $\mathbf{h}_2$, $\mathbf{h}_1$ и $\mathbf{d}_{1...4}$. Для получения диагностического признака γ проводится сравнение модулей вектора-разницы исследуемого состояния $|\mathbf{l}_{0...4}|$ и $|\mathbf{h}_1|$ путем их деления. Диагностический признак γ измеряется в процентах:

$$\gamma = \frac{|\mathbf{l}_{0...4}|}{|\mathbf{h}_1|} 100\%, \quad (3)$$

где $\mathbf{l}_0$ – вектор-разница векторов коэффициентов неповрежденного состояния $\mathbf{h}_1$ и

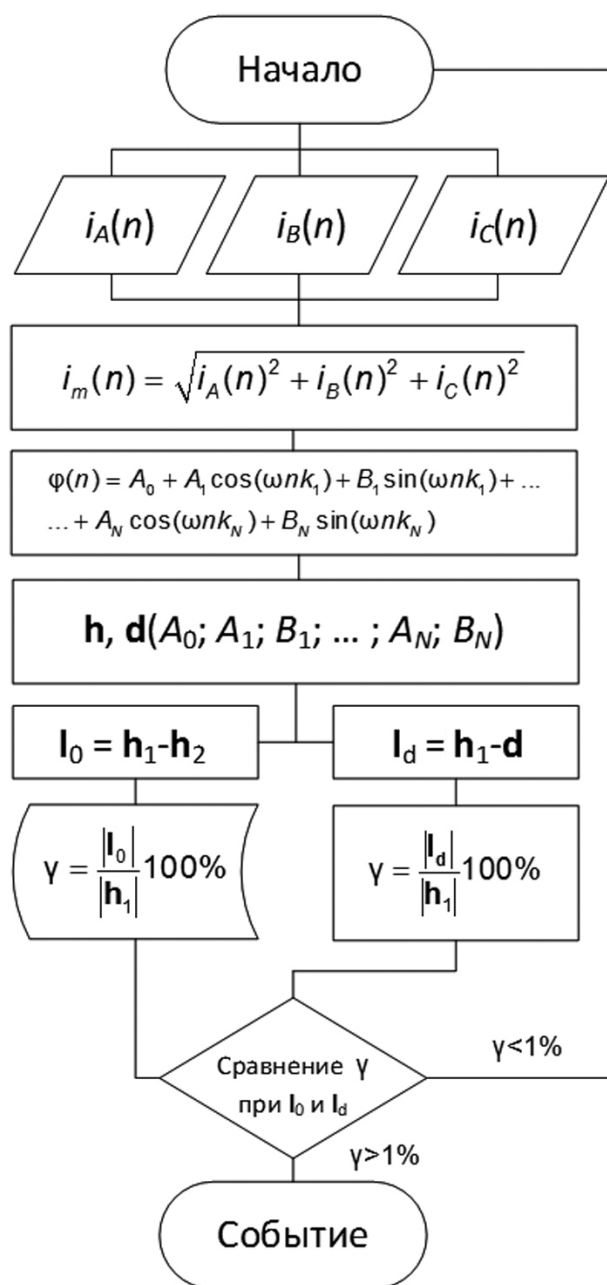


Рис. 6. Схема работы предлагаемой системы диагностирования

Fig. 6. Operation diagram of the proposed diagnostic system

другого участка сигнала также неповрежденного состояния $\mathbf{h}_2$, $\mathbf{l}_{1...4}$ – четыре разных вектора коэффициентов поврежденного состояния (обрыв одного, двух, трех и четырех стержней). Данный метод был апробирован также на разных типах АД, разной мощности и разным количестве стержней «беличьей клетки» в работе авторов [19]. Схема рабо-

⁶Дедус Ф.Ф., Панкратов А.Н., Куликова Л.И., Тетуев Р.К. Классические ортогональные базисы в задачах аналитического описания и обработки информационных сигналов: учеб. пособ. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004. 168 с. EDN: QMNXPZ.

⁷Конеv В.В. Векторная алгебра: учеб. пособ. Томск: Томский политех. ун-т, 2008. 31 с.

ты предлагаемого метода диагностирования представлена на рис. 6.

Таким образом, проводя ряд натурных экспериментов, было получено семейство векторов весовых коэффициентов при базисных функциях во всех интересующих состояниях испытуемого АД: в целом состоянии, с обрывом одного стержня, двух, трех и четырех стержней. По описанной выше процедуре были проведены сравнения диагностического признака и сделан вывод о том, что представленный метод обладает чувствительностью, способной выявить разницу между сигналом целого состояния и с обрывом одного стержня. Также данный метод показывает свою работоспособность на сигналах, полученных от разных АЦП при разных частотах дискретизации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод математической обработки цифровых сигналов токовых цепей, являющийся основным элементом данного исследования, показал свою пригодность в вопросах

диагностирования при выполнении работ. Сигналы модуля результирующего вектора токов статора i_m , полученные при частоте дискретизации 10 кГц в исследуемых состояниях, на которых разрабатывался метод, представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, как визуально отличаются кривые сигнала i_m в зависимости от степени внутреннего повреждения (неповрежденного состояния, обрыва одного, двух, трех и четырех стержней).

Проведение математической обработки экспериментальных данных методом аппроксимации по (2), выделение модулей векторов по (3), критериев для сравнения и получения диагностического признака по (4) для всех полученных экспериментальных отрезков данных проводилось в программном комплексе Mathcad. При этом использовался стандартный математический оператор регрессионного анализа по методу наименьших квадратов *linfit* [20].

Для получения более точных результатов и их проверки были обработаны и сравнены по два участка разного количества n (200 и 4000). Результаты представлены в табл. 2.

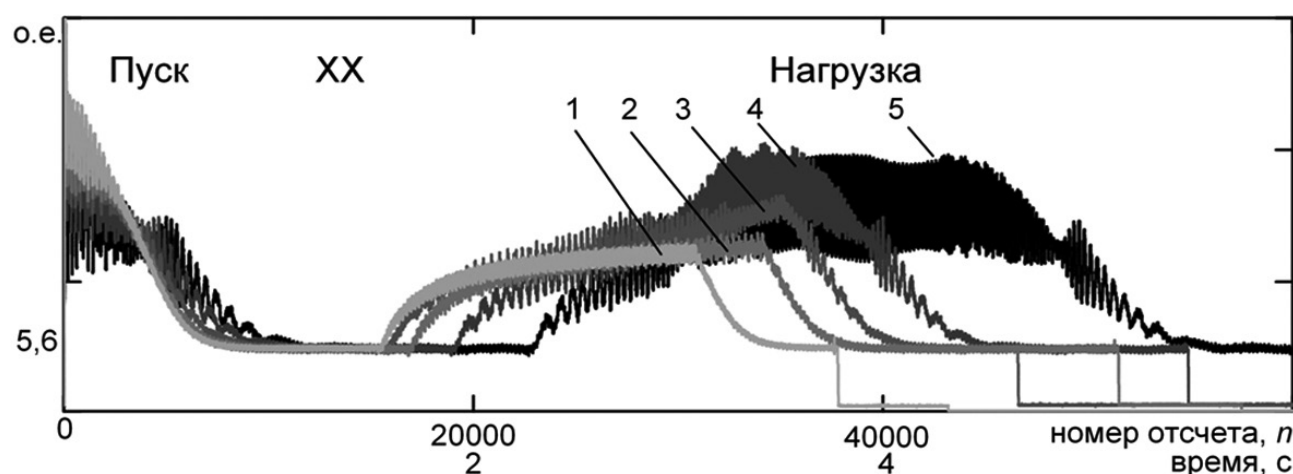


Рис. 7. Сигнал модуля результирующего вектора токов статора всего эксперимента во всех режимах:

1 – не поврежден, 2 – обрыв одного стержня, 3 – двух, 4 – трех, 5 – четырех стержней

Fig. 7. Signal of the stator current resultant vector modulus during the whole experiment in all modes:

1 – not damaged, 2 – one bar failure, 3 – two bar failure, 4 – three bar failure, 5 – four bar failure

Таблица 2. Результат обработки сигналов при 10 кГц

Table 2. Signal processing result at 10 kHz

Внутреннее повреждение	Диагностический признак γ , %	
	При 200 n	При 4000 n
Нет повреждения	0,79	0,81
Обрыв 1-го стержня	4,24	4,67
Обрыв 2-х стержней	5,12	5,32
Обрыв 3-х стержней	5,84	5,98
Обрыв 4-х стержней	6,13	6,41

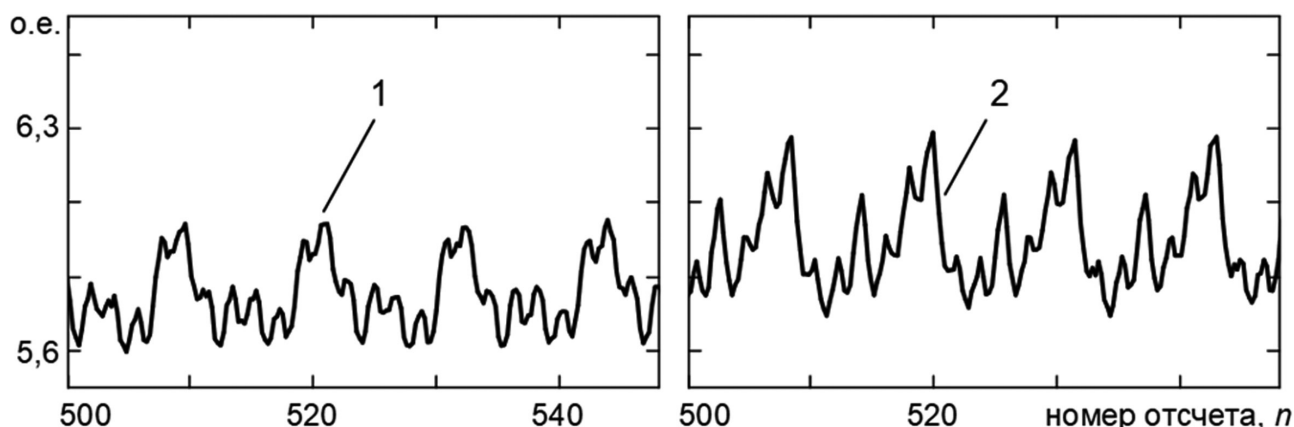


Рис. 8. Сигналы модуля результирующего вектора i_m , полученные на микропроцессорном блоке релейной защиты и автоматики: 1 – целое состояние, 2 – обрыв одного стержня

Fig. 8. Signals of the resultant vector i_m modulus received on the microprocessor relay protection and automation unit: 1 – undamaged state, 2 – one bar failure

Таблица 3. Результат обработки сигналов от микропроцессорного блока релейной защиты и автоматики при 2,4 кГц

Table 3. Result of processing signals from microprocessor relay protection and automation unit at 2.4 kHz

Внутреннее повреждение	Диагностический признак γ , %	
	При 48 n	При 192 n
Нет повреждения	0,87	0,49
Обрыв 1-го стержня	3,94	3,9
Обрыв 2-х стержней	4,48	4,51
Обрыв 3-х стержней	4,96	4,93
Обрыв 4-х стержней	5,25	5,11

Сигналы модуля результирующего вектора i_m , полученные при частоте дискретизации 2,4 кГц от стандартного МБРЗА, размером 48 n (один период 50 Гц) представлены на рис. 8.

Аналогично кривым сигнала i_m на рис. 7, такие же кривые рис. 8 тоже показывают тенденцию к увеличению уровня и появлению дополнительных гармонических составляющих.

Для получения более точных результатов и их проверки обработали и сравнили по два участка разного количества n (48 и 192). Результаты представлены в табл. 3.

Из табл. 2 и 3 видно, что диагностический признак с обрывом одного стержня значительно превышает такой же признак, но в целом состоянии – в несколько раз, благодаря чему чувствительность к внутреннему повреждению относительно общего количества стержней роторной цепи 28 составляет 3%. С повышением степени повреждения (два, три, четыре стержня) АД диагностический признак показывает тенденцию к возрастанию, что позволяет утверждать о

его применимости в вопросах диагностики внутренних повреждений электрооборудования. Все исследования проводились при двенадцати гармонических составляющих и базовой частоте 50 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования была создана экспериментальная установка с возможностью создания сложнодиагностируемого внутреннего повреждения электрооборудования. Отличительной особенностью является возможность восстанавливать его в исходное состояние для обеспечения повторяемости и проверки получаемых результатов.

Получен цифровой сигнал модуля результирующего вектора потребляемых токов от специализированного лабораторного 12-битного АЦП с частотой дискретизации 10 кГц и от штатного устройства микропроцессорной релейной защиты и автоматики с частотой дискретизации 2,4 кГц.

Апробирован разработанный метод математической обработки цифровых токовых

сигналов, основанный на регрессионном анализе в гармоническом базисе. При этом анализу подвергается сигнал модуля результирующего вектора токов статора, который в одном временном ряду содержит информацию по всем трем фазам, что сокращает временные и аппаратные затраты на диагностирование. Также полученный метод имеет гибкую систему адаптации под различные устройства АЦП и разные виды оборудования путем увеличения и уменьшения гармонического состава и применения других базисных функций.

Метод был применен для анализа сигнала, полученного при условиях, в которых регистрируются осциллограммы токов и напряжений в реальных условиях и при стандартном оборудовании. Из результатов видно, что ухудшение внутреннего состояния на 3%

в разы увеличивает исследуемый критерий и в целом состоянии с 0,87% становится 3,9%. Таким образом, определены возможность применения, дальнейшее развитие и внедрение методов математической обработки токовых сигналов в базовое программное обеспечение для диагностики повреждений средствами современной микропроцессорной релейной защиты и автоматики.

В развитии данного направления следует отметить применение других базисных функций при аппроксимации регрессионным анализом, соответствующих форме кривой исходного сигнала, что дает возможность исследовать сигнал не только установившихся режимов работы электрооборудования (холостой ход, равномерная нагрузка), но и переходных процессов (пуск, наброс нагрузки, снятие нагрузки).

Список источников

1. Литвинов С.Н., Лебедев В.Д., Гусенков А.В. Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 322–338. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>. EDN: TQSDVV.
2. Chisedzi L.P., Muteba M. Detection of broken rotor bars in cage induction motors using machine learning methods // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 22. P. 9079–9087. <https://doi.org/10.3390/s23229079>.
3. Zhou Guangyang, Zhang Xiahui, Han Minxiao, Filizadeh S., Geng Zhi. Single-ended fault detection scheme using support vector machine for multi-terminal direct current systems based on modular multilevel converter // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2023. Vol. 11. Iss. 3. P. 990–1000. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000404>. EDN: DKBSJP.
4. Bahgat B.H., Elhay E.A., Sutikno T., Elkholy M.M. Revolutionizing motor maintenance: a comprehensive survey of state-of-the-art fault detection in three-phase induction motors // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2024. Vol. 15. Iss. 3. P. 1968–1989. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1968-1989>.
5. Bechiri M.B., Allal A., Naoui M., Khechekhouché A., Alsaif H. Effective diagnosis approach for broken rotor bar fault using Bayesian-based optimization of machine learning hyper parameters // IEEE Access. 2024. Vol. 12. Iss. 6. P. 139923–139936. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3464108>.
6. Kumar R.S., Indragandhi, V., Aljafari, B., Kareri, T. Rotor bar fault diagnosis in indirect field-oriented control-fed induction motor drive using Hilbert transform, discrete wavelet transform, and energy eigenvalue computation // Machines. 2023. Vol. 11. Iss. 7. P. 711. <https://doi.org/10.3390/machines11070711>.
7. Ghanbari T., Mehraban A. Stator winding fault detection of induction motors using fast Fourier transform on rotor slot harmonics and least square analysis of the Park's vectors // IET Electric Power Applications. 2023. Vol. 18. Iss. 7. P. 356–366. <https://doi.org/10.1049/elp2.12394>.
8. Ameid T., Ammar A., Talhaoui H., Azzoug Yo. An automatic rotor bar fault diagnosis using fuzzy logic and DWT-energy for backstepping control driven induction motor in low-speed operation // Soft Computing. 2023. Vol. 27. Iss. 15. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08443-y>.
9. Курилин С.П. Методы тестирования технического состояния асинхронных электродвигателей в процессе эксплуатации // Вестник Московского энергетического института. 2022. № 6. С. 11–20. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-6-11-20>.
10. Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3. С. 99–113. EDN: WEXWZR.
11. Баннов Д.М., Крицкий М.В. Разработка экспериментальной установки для исследований диагностических признаков повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: матер. IX Междунар. молодежной науч.-техн. конф. (г. Казань, 1–5 октября 2018 г.). Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. Т. 3. С. 237–238. EDN: ZAXFDV.
12. Шахнович Д.И. Разработка программно-технической среды для испытаний устройств релейной защиты на базе терминала БМРЗ-51 производства НТЦ «Механотроника» // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXVIII

- Междунар. молодежного науч. симпозиума им. акад. М.А. Усова, посвященного 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева и 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова (г. Томск, 1–5 апреля 2024 г.). Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. С. 231–233. EDN: VJDKXQ.
13. Дрейпер Г., Смит Д. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. 3-е изд. М.: Диалектика, 2017. 912 с.
14. Мартюгин С.А., Поршневу С.В. О возможности повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем с OFDM с помощью дробного преобразования Фурье // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Т. 12. № 7. С. 71–79. EDN: UXUJDT.
15. Гришаев Д.А., Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б. Обработка экспериментальных результатов суперкавитационного обтекания конуса методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS) // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 3. С. 518–526. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.
16. Pramesti W., Damayanti I., Asfani D. Stator fault identification analysis in induction motor using multinomial logistic regression // *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*. 2016. P. 439–442. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828700>.
17. Chao Zhao. Trend analysis of rotor-to-stator impact-rub based on smooth support vector regression // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2014. Vol. 50. Iss. 3-4. P. 243. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.066735>.
18. Топонен Н.А., Геворкян М.Н. Реализация трёхмерной проективной геометрической алгебры на высокоуровневом языке программирования // *Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: матер. Всерос. конф. с междунар. участием* (г. Москва, 17–21 апреля 2023 г.). М.: Российский университет дружбы народов, 2023. С. 240–245. EDN: XHDQSK.
19. Баннов Д.М., Полищук В.И. Метод обработки сигналов токов статора асинхронного двигателя для диагностики обрыва стержня ротора // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2024. № 4. С. 64–72. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.4.064-072>. EDN: BTWJEE.
20. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании: монография. М.: СОЛОН-Пресс, 2008. 576 с.

References

1. Litvinov S.N., Lebedev V.D., Gusenkov A.V. Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):322-338. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>. EDN: TQSDVV.
2. Chisedzi L.P., Muteba M. Detection of broken rotor bars in cage induction motors using machine learning methods. *Sensors*. 2023;23(22):9079-9087. <https://doi.org/10.3390/s23229079>.
3. Zhou Guangyang, Zhang Xiahui, Han Minxiao, Filizadeh S., Geng Zhi. Single-ended fault detection scheme using support vector machine for multi-terminal direct current systems based on modular multilevel converter. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2023;11(3):990-1000. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000404>. EDN: DKBSJP.
4. Bahgat B.H., Elhay E.A., Sutikno T., Elkholy M.M. Revolutionizing motor maintenance: a comprehensive survey of state-of-the-art fault detection in three-phase induction motors. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2024;15(3):1968-1989. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1968-1989>.
5. Bechiri M.B., Allal A., Naoui M., Khechekhouché A., Alsaif H. Effective diagnosis approach for broken rotor bar fault using Bayesian-based optimization of machine learning hyper parameters. *IEEE Access*. 2024;12(6):139923-139936. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3464108>.
6. Kumar R.S., Indragandhi, V., Aljafari, B., Kareri, T. Rotor bar fault diagnosis in indirect field-oriented control-fed induction motor drive using Hilbert transform, discrete wavelet transform, and energy eigenvalue computation. *Machines*. 2023;11(7):711. <https://doi.org/10.3390/machines11070711>.
7. Ghanbari T., Mehraban A. Stator winding fault detection of induction motors using fast Fourier transform on rotor slot harmonics and least square analysis of the Park's vectors. *IET Electric Power Applications*. 2023;18(7):356-366. <https://doi.org/10.1049/elp2.12394>.
8. Ameid T., Ammar A., Talhaoui H., Azzoug Yo. An automatic rotor bar fault diagnosis using fuzzy logic and DWT-energy for backstepping control driven induction motor in low-speed operation. *Soft Computing*. 2023;27(15):1-16. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08443-y>.
9. Kurilin S.P. Induction motors technical condition in-service testing methods. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022;6:11-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-6-11-20>.
10. Khalyasmaa A.I., Revenkov I.S., Sidorova A.V. Application of digital twin technology for analysis and prediction state of power transformer equipment. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2022;14(3):99-113. (In Russ.). EDN: WEXWZR.
11. Bannov D.M., Bannov D.M., Krickij M.V. Development of an experimental setup for studying diagnostic signs of damage to a short-circuited rotor winding of an induction motor. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: materialy IX Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Electric Power Industry through the Eyes of Youth – 2018: Proceedings of the 9th International youth scientific and technical conference*.

1–5 October 2018, Kazan'. Kazan': Kazan State Power Engineering University; 2018, vol. 3, p. 237-238. (In Russ.). EDN: ZAXFDV.

12. Shakhnovich D.I. Development of a software and hardware environment for testing relay protection devices based on the microprocessor relay protection and automation terminal manufactured by the Mechatronic Research Centre. In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXVIII Mezhdunarodnogo molodezhnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova, posvyashchennogo 125-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Akademii nauk SSSR, professora K.I. Satpaeva i 130-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta Akademii nauk SSSR, professora F.N. Shahova* = *Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the 28th International Youth Scientific Symposium named after the Academician M.A. Usov dedicated to the 125th birth anniversary of the Academician of the USSR Academy of Sciences, Professor K.I. Satpaev and the 130th birth anniversary of the Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences, Professor F.N. Shakhov*. 1–5 April 2024, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2024, p. 231-233. (In Russ.). EDN: BJDXXQ.

13. Draper G., Smith D. Applied regression analysis. New York: John Wiley & Sons; 1981. (Russ. ed.: *Prikladnoy regressionnyy analiz*. Moscow: Dialektika; 2017, 912 p.)

14. Martyugin S.A., Porshnev S.V. On the possibility of increasing the noise immunity of OFDM telecommunication systems using fractional Fourier transforms. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(7):71-79. (In Russ.). EDN: UXUJDT.

15. Grishaev D.A., Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B. Processing of experimental results for super-cavitating flow past cone by local polynomial regression (LOESS). *iPolytech Journal*. 2023;27(3):518-526. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.

16. Pramesti W., Damayanti I., Asfani D. Stator fault identification analysis in induction motor using multinomial logistic regression. In: *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*. 2016;439-442. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828700>.

17. Chao Zhao. Trend analysis of rotor-to-stator impact-rub based on smooth support vector regression. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2014;50(3-4):243. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.066735>.

18. Toponen N.A., Gevorkyan M.N. Implementation of three-dimensional projective geometric algebra in a high-level programming language. In: *Informacionno-telekommunikacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie vysokotekhnologichnykh sistem: materialy Vserossiyskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = *Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems: Proceedings of All-Russian Conference with international participation*. 17–21 April 2023, Moscow. M.: Peoples' Friendship University of Russia; 2023, p. 240-245. (In Russ.). EDN: XHDQSK.

19. Bannov D.M., Polishchuk V.I. Method of processing signals of stator currents of induction motor to diagnose broken rotor bar. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2024;4:64-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.4.064-072>. EDN: BTWJEE.

20. D'yakonov V.P. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 in mathematics and modeling*. Moscow: SOLON-Press; 2008, 576 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баннов Дмитрий Михайлович,

к.т.н.,
старший преподаватель
кафедры электрических станций,
Самарский государственный технический университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,
Россия
✉ bannov.dm@samgtu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

Полищук Владимир Иосифович,

д.т.н., профессор,
профессор Политехнической школы,
Югорский государственный университет,
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16, Россия
polischuk_vi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry M. Bannov,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Lecturer of the
Electric Power Plant Department,
Samara State Technical University,
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia
✉ bannov.dm@samgtu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

Vladimir I. Polishchuk,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Polytechnical School,
Yugra State University,
16, Chekhov St., Khanty-Mansiysk 628012, Russia
polischuk_vi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.11.2024 г.; принята к публикации 27.11.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 05.11.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 27.11.2024.