



## ПРИМЕНЕНИЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ БЛОКОВ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.И. Полищук<sup>2</sup>, М.В. Крицкий<sup>1</sup>, Д.М. Баннов<sup>1</sup>, С.В. Малышев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

<sup>2</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

г. Барнаул, Россия

polischuk\_vi@mail.ru

**Резюме:** Статья посвящена актуальной тематике, связанной с выявлением дефектов в роторной обмотке электрических машин. В основу положено экспериментальное снятие и цифровая обработка электрических сигналов с контролируемых обмоток. Исследование проведено с использованием двух экспериментальных установок, для асинхронного двигателя и синхронного генератора соответственно. Отличительная особенность предлагаемых исследовательских стендов – в решении задач цифровой обработки и анализа данных на основе применения блока микропроцессорной релейной защиты БМРЗ отечественной разработки. Применен также метод вейвлет-разложения для выделения детализирующей компоненты. Приведены результаты экспериментов для обрыва в стержне короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Показано, что микропроцессорное устройство БМРЗ способно проводить оцифровку с частотой дискретизации, удовлетворяющей требованиям, и в совокупности с алгоритмами обработки данных, осуществляющими селективное определение трудновывяемых дефектов, применимо в задачах диагностики электрических машин.

**Ключевые слова:** микропроцессорный блок релейной защиты, экспериментальные исследования, лабораторная установка, система диагностики.

**Для цитирования:** Полищук В.И., Крицкий М.В., Баннов Д.М., Малышев С.В. Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 93-100. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100.

## APPLICATION OF UNIFIED MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION UNITS IN ELECTRICAL MACHINE DIAGNOSTICS

VI Polishchuk<sup>2</sup>, MV Kritsky<sup>1</sup>, DM Bannov<sup>1</sup>, SV Malyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University, Samara, Russia

<sup>2</sup>Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

polischuk\_vi@mail.ru

**Abstract:** The article concentrates on the topical issue connected with the detection of defects in the rotor winding of electric machines. The experimental sampling and digital processing of electrical signals from controlled windings is in the basis. The authors conducted the research using two experimental units for asynchronous motor and synchronous generator, respectively. A distinctive feature of the proposed research stands is in solving the problems of digital processing and data analysis on the basis of the application of microprocessor relay protection unit BMRZ developed in Russia. The authors applied method of wavelet decomposition to select the detailing component. They also presented the results of experiments for the breakage in the short-circuit rotor of an asynchronous motor and proved

that the microprocessor-based BMRZ device is capable of digitizing at a sampling rate that meets the requirements, and in conjunction with the data processing algorithms that carry out the selective determination of hard-to-detect defects, is applicable in the diagnosis of electrical machines.

**Keywords:** microprocessor relay protection unit, experimental studies, laboratory installation, diagnostic system.

**For citation:** Polishchuk VI , Kritsky MV ,Bannov DM , Malyshev SV. Application of unified microprocessor relay protection units in electrical machine diagnostics. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):93-100. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100.

### Введение

Роторные цепи электрических машин вследствие своих конструктивных особенностей и условий эксплуатации подвержены возникновению в них трудновывяемых дефектов, что в свою очередь может приводить к выходу их из строя, а значит к нарушениям технологических процессов и существенным финансовым издержкам [1-3]. В связи с этим очень важен вопрос диагностики электрических машин переменного тока, особенно мощных двигателей и генераторов. Интерес специалистов и ученых к вопросам эксплуатационной диагностики в настоящее время высок [4,5]. Однако используемые в России для целей диагностики и защиты технические средства, как правило, не обладают достаточными функциональными возможностями, так, например, стандартные средства РЗА в основном реализуют функции токовой защиты и не осуществляют диагностику неисправностей электрических машин [6-8]. При разработке устройств релейной защиты и систем технической диагностики электроэнергетического оборудования, базирующихся на новых методах обработки цифровой информации, всегда остро стоит вопрос об аппаратных средствах для их реализации, в том числе, чтобы элементная база действующего устройства содержала как можно меньше «дефицитных» и импортных частей или позволяла бы использовать штатную аппаратную часть [9-11].

В настоящее время большинство устройств систем технической диагностики сложных электроэнергетических объектов разрабатывается на микропроцессорной функциональной основе [12]. Диагностические же сигналы получают с измерительных датчиков, как правило, аналоговых. Использование возможностей цифровой обработки диагностических сигналов имеет широкие возможности по качественному выделению полезной информации алгоритмами цифровой фильтрации, алгоритмов корреляционного анализа, спектрального анализа, обратной сверки, специальных алгоритмов линейного предсказания и методов искусственного интеллекта [13, 14].

В рамках решения общей актуальной задачи по разработке технических решений, направленных на своевременное выявление дефектов в роторной обмотке машин переменного тока, нами предлагается применение унифицированного блока микропроцессорной релейной защиты отечественной разработки для цифровой обработки и анализа данных о фазных токах статорной обмотки.

### Материалы и методы

Основой для аппаратной реализации выступает микропроцессорный блок БМРЗ, а в качестве алгоритмической основы – вейвлет-преобразование. На рис. 1 представлен алгоритм предлагаемого на этой базе метода обработки данных.

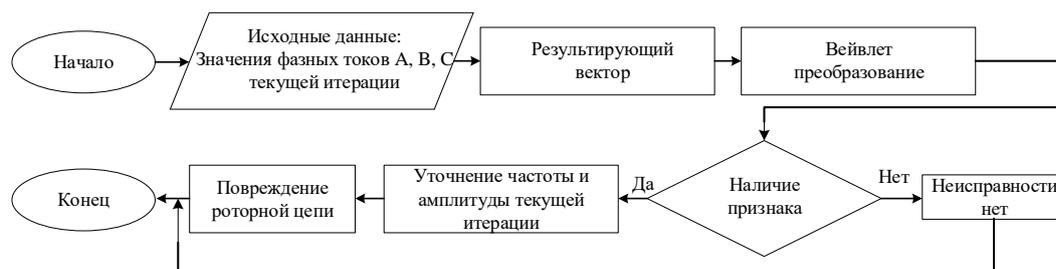


Рис. 1. Алгоритм обработки данных

Обработка сигналов токов осуществляется посредством блока типа БМРЗ-152-2Д-КЛ<sup>1</sup>. Информационными сигналами выступают токи и напряжения от стандартных датчиков (трансформаторов тока (ТТ)). На рис. 2 схематично изображена функциональная схема работы микропроцессорного блока, в которой показана последовательность прохождения получаемого аналогового сигнала от ТТ (ТА) с последующим сбором и объединением в единый массив данных мультиплексорным устройством (МПл), их оцифровкой АЦП. Оцифрованные сигналы поступают на входы портов ввода-вывода (ПВВ) для последующей работы процессора. Сигнал о возникновении повреждения вырабатывается арифметико-логическим устройством (АЛУ). АЛУ получает от оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) текущие значения оцифрованных аналоговых величин тока. При возникновении условий – уставки, заложенной в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), происходит выработка выходного аварийного сигнала (АС). Управление устройством осуществляется обслуживающим персоналом как с клавиатуры (Кл) на лицевой стороне, так и дистанционно с ключа или удаленно по каналам связи RS-485. Основная необходимая информация отображается на дисплее устройства (ЖКИ).

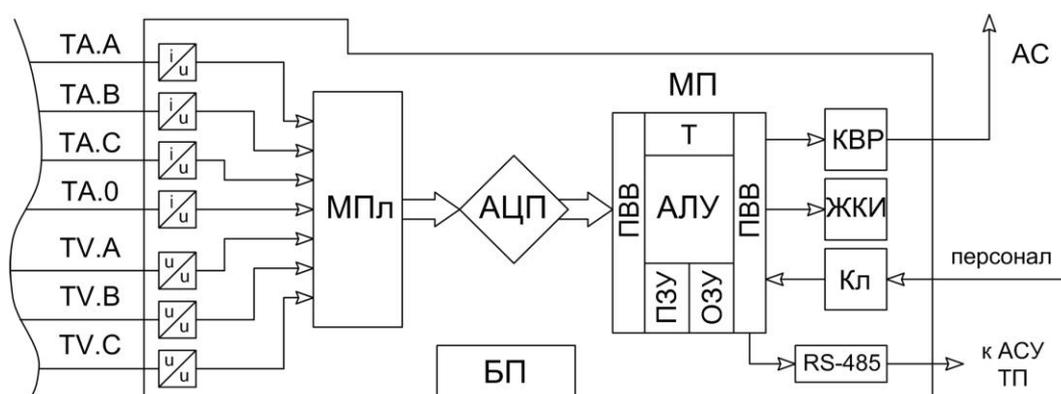


Рис. 2. Функциональная схема работы микропроцессорного устройства РЗА

Обрабатываются временные ряды экспериментально полученных статорных токов, оцифрованных с частотой 2400 Гц с использованием теории вейвлет-преобразования [15]. Вейвлет-анализу подвергается результирующий модуль вектора токов статора АД, определяемый через мгновенные значения фазных токов статора по формуле:

$$I_{OB} = \sqrt{(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)},$$

где  $I_{OB}$  – обобщенный вектор токов статора;  $I_A, I_B, I_C$  – мгновенные значения токов фаз статора.

Непрерывное прямое вейвлет-преобразование производится на основе следующего выражения:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt,$$

где  $\psi$  – вейвлет-коэффициенты;  $a$  – параметр масштаба;  $b$  – параметр времени;  $t$  – базисная функция.

Большие значения  $a$  соответствуют низким частотам, а маленькие значения  $b$  – высоким. В качестве базисной функции была выбрана функция Хаара. Уровень декомпозиции сигнала определяется десятью вейвлет-компонентами, используемыми при разложении [16].

Выделение диагностических признаков производится на базе разработанных авторами методов для диагностики обмотки ротора синхронного генератора (СГ) [17] и для обмотки ротора асинхронного двигателя АД [18] и, соответственно, используются две экспериментальные установки.

Для анализа работы АД при повреждениях роторной обмотки в различных режимах работы (холостой ход, нагрузка) создана экспериментальная установка со

1. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-152-КЛ-01. Руководство по эксплуатации ДИВГ.648228.039-02.03. НТЦ «Механотроника». 2017. 71 с.

следующим составом оборудования: АД мощностью 3 кВт, 1450 об/мин, максимальный ток 7,4 А; АД мощностью 3 кВт 1350 об/мин, с аппаратурой для выпрямления напряжения; микропроцессорный блок БМРЗ, на зажимы которого подаются исследуемые сигналы. Она представлена на рис. 3.

По аналогичному принципу собрана экспериментальная установка для исследования работы синхронного генератора (СГ) при наличии повреждения в обмотке ротора (витковое замыкание). Её внешний вид приведен на рис. 5. Она включает в себя двухполюсный синхронный генератор мощностью 2 кВА; привод на основе машины постоянного тока 110 В, 3000 об/мин с пусковой аппаратурой; регулируемый возбудитель выпрямленного напряжения для подключения роторной цепи; микропроцессорный блок БМРЗ, на зажимы которого подавались сигналы с датчиков тока и напряжения.



Рис. 3. Лабораторная установка для исследования работы АД

В качестве нагрузки к исследуемому АД посредством соединительной муфты присоединялся другой двигатель с режимом работы «электродинамический тормоз». Такое сочетание асинхронных машин хорошо показало свою пригодность к использованию для решения поставленных задач. Схема подключения испытуемого оборудования представлена на рис. 4

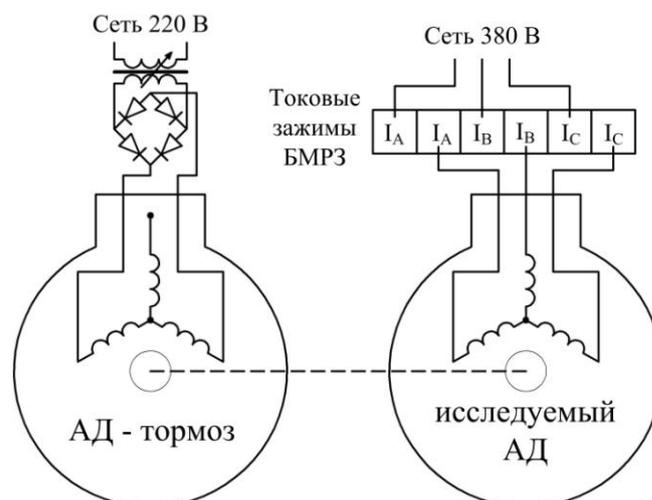


Рис. 4. Схема подключения АД



Рис. 5. Лабораторная установка для исследования работы СГ

Схема подключения синхронного генератора к микропроцессорному блоку показана на рис. 6.

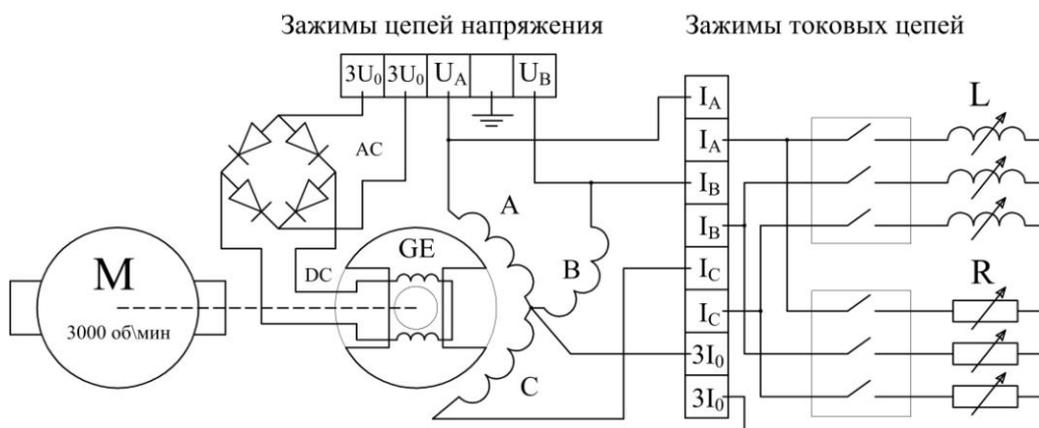


Рис. 6. Схема подключения СГ

### Обсуждение результатов

В данной статье остановимся подробнее на результатах, касающихся АД.

Следует отметить, что полученные временные ряды имеют частоту дискретизации 2400 Гц, соответствующую 48 замерам за период, что вполне удовлетворяет требования технической диагностики.

На рис. 7 в качестве примера показана осциллограмма результирующего модуля вектора тока, определяемого через мгновенные значения фазных токов статорной обмотки АД, в режимах пуска, выхода на холостой ход и нагрузки. Полученный в БМР3 сигнал, представленный на рисунке в виде осциллограммы, также может быть открыт с помощью программного пакета *FastView* или в виде таблице *Excel*.

При поиске диагностического признака обрыва в стержне короткозамкнутого ротора АД наиболее информативной оказалась пятая детализирующая компонента (D5). D5-компонента, выделенная из обобщающего вектора тока АД при обрыве одного стержня из тридцати семи, увеличивается примерно в четыре раза, изменения в других компонентах не наблюдаются. С увеличением числа оборванных стержней D5

увеличивается, что свидетельствует о правильности выбора диагностического признака. В переходных режимах D5 также показывает рост, что потребовало отстройки критерия повреждения от переходных режимов.

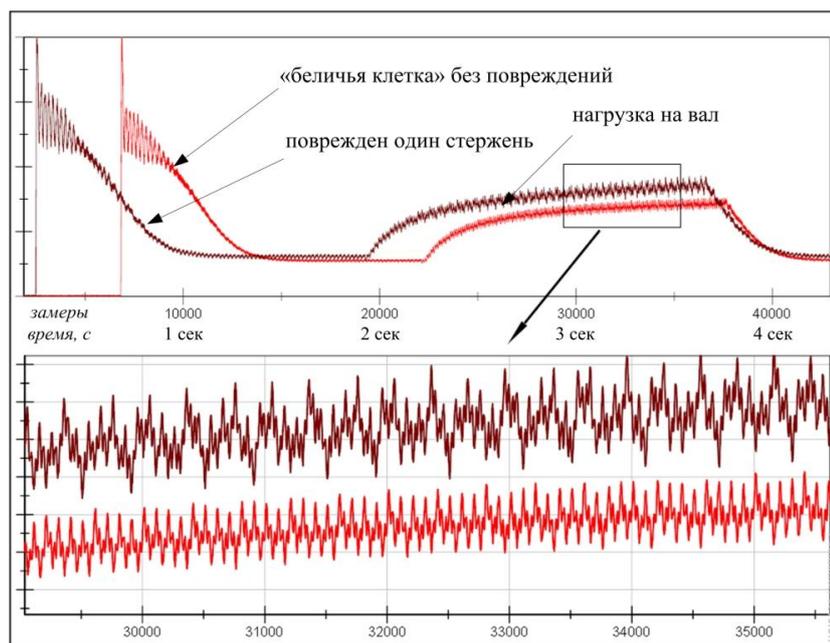


Рис. 7. Полученная от БМР3 осциллограмма результирующего тока статора АД

### Заключение

Технические характеристики штатного микропроцессорного устройства релейной защиты БЗРМ дают возможность использовать его в качестве элемента сбора и обработки данных при разработке новых защитно-диагностических устройств синхронных генераторов и асинхронных двигателей. В совокупности с алгоритмами обработки данных, осуществляющими селективное определение трудновывяляемого дефекта и идентифицирующими изменение технического состояния электрических машин, унифицированные блоки микропроцессорной релейной защиты применимы для задач технической диагностики электрических машин.

### Литература

1. Kurilin S.P., Denisov V. N. The development of topological diagnostic methods of asynchronous electric machines // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018. Iss. 6. pp. 214-221.
2. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Диагностика параметров электрических машин переменного тока // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 4(37). С. 38-44.
3. Broken rotor bar fault diagnosis using fast Fourier transform applied to field-oriented control induction machine: simulation and experimental study // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. V.92 (1-4). pp. 917-928.
4. Mazzoletti M.A. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. V 64. Is. 9. pp. 7218-7228.
5. Коробейников А.Б. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 1 (26). С. 4-9.
6. Bernat P., Нутка Z., Касор P. Indication of failures of rotor bar on induction machine with squirrel cage rotor in its external electromagnetic field // *Proceedings of the 2015 16th international scientific conference on electric power engineering (EPE)*. 2015. pp. 691-696.
7. Шевчук В.А. Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя // *Международный студенческий научный вестник*. 2015. № 3-4. С. 419-423.
8. Сидельников Л.Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2013. № 7. С. 127-137.
9. Babaa F. Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines // *Frontiers in Energy*. 2013.V.7. Is. 3. pp. 271-278.
10. Федоров М.М. Метод диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных

обмотках асинхронных двигателей // Взрывозащищенное электрооборудование. 2011. № 1. С. 168-174.

11. Faiz J., Ebrahimi B.V., Sharifian M.B. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review // *Electromagnetics*. 2006. V.26. Iss. 7. pp. 543-569.

12. Ковалев А.А, Галкин А.Г. Надежность и техническая диагностика устройств электроэнергетики. Екатеринбург: изд-во УрГУПС. 2014. 105 с.

13. Бушнев Д.В., Романов А.В. Теоретические основы цифровой обработки сигналов. Воронеж: Воронежский государственный технический университет. 2005. 116 с.

14. Дьяков А.Ф., Овчаренко Н.И. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем. М.: Издательский дом МЭИ. 2010. 336 с.

15. Глазырина Т.А. Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Томск, 2012. 120 с.

16. Полищук В.И., Глазырин А.С., Глазырина Т.А. Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин // *Электричество*. 2012. № 6. С. 42-45.

17. Полищук В.И. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых замыканий обмотки ротора // Патент РФ № 2546131. 10.04.2015. Бюл. №10.

18. Баннов Д.М., Полищук В.И., Разработка усовершенствованного метода диагностирования дефектов роторной обмотки асинхронных двигателей // Международная молодежная научная конференция «Королевские чтения» (Самара 03-05 октября 2017 г.). Самара: Издательство Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. 2017. С. 495-497.

#### Авторы публикации

**Полищук Владимир Иосифович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

**Крицкий Михаил Викторович** – аспирант, Самарский государственный технический университет.

**Баннов Дмитрий Михайлович** – аспирант, Самарский государственный технический университет.

**Малышев Сергей Викторович** – аспирант, Самарский государственный технический университет.

#### References

1. Kurilin SP, Denisov VN. The development of topological diagnostic methods of asynchronous electric machines. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018;6:214-221.

2. Bryakin IV, Bochkarev IV, Kelebaev KK. Diagnostika parametrov elektricheskikh mashin peremennogo toka. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2017;4(37):38-44.

3. Broken rotor bar fault diagnosis using fast Fourier transform applied to field-oriented control induction machine: simulation and experimental study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92 (1-4):917-928.

4. Mazzoletti MA. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;6(49):7218-7228.

5. Korobeinikov AB. Analiz sushchestvuyushchikh metodov diagnostirovaniya elektrodvigateli i perspektivy ikh razvitiya. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2015;1(26):4-9.

6. Bernat P, Hytka Z, Kacor P. Indication of failures of rotor bar on induction machine with squirrel cage rotor in its external electromagnetic field. *Proceedings of the 2015 16th international scientific conference on electric power engineering (EPE)*. 2015. pp.691-696.

7. Shevchuk VA. Sravnenie metodov diagnostiki asinkhronnogo dvigatelya. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik*. 2015;3-4:419-423.

8. Sidel'nikov LG. Obzor metodov kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh dvigatelei v protsesse ekspluatatsii. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2013;7:127-137.

9. Babaa F. Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines. *Frontiers in Energy*. 2013;7(3):271-278.

10. Fedorov MM. Metod diagnostirovaniya obryvov i mezhvitkovykh замыканий v statornykh obmotkakh asinkhronnykh dvigatelei. *Vzryvozashchishchennoe elektrooborudovanie*. 2011;1:168-174.

11. Faiz J, Ebrahimi BV, Sharifian MB. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review. *Electromagnetics*. 2006;26(7):543-569.

12. Kovalev AA, Galkin AG. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika ustroystv elektroenergetiki*. Ekaterinburg: izd-vo UrGUPS. 2014. P.105 .
13. Bushnev DV, Romanov AV. *Teoreticheskie osnovy tsifrovoi obrabotki signalov*. Voronezh: Voronezh. gosudarstvennyi. tekhnicheskii universitet. 2005. P.116 .
14. D'yakov AF, Ovcharenko NI. *Mikroprotsessornaya avtomatika i releinaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem*. M.: Izdatel'skii dom MEI. 2010. P. 336.
15. Glazyrina TA. *Sovershenstvovanie metodov diagnostiki asinkhronnykh dvigatelei na osnove analiza potrebyaemykh tokov*: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.02. Tomsk, 2012. P. 120.
16. Polishchuk VI, Glazyrin AS, Glazyrina TA. Funktsional'naya veivlet-diagnostika sostoyaniya obmotok rotorov trekhfaznykh elektricheskikh mashin. *Elektrichestvo*. 2012;6:42-45.
17. Polishchuk VI. *Sposob zashchity sinkhronnoi elektricheskoi mashiny ot vitkovykh zamykaniy obmotki rotora*. Patent RF № 2546131. Byul. №10.
18. Bannov DM, Polishchuk VI. Razrabotka usovershenstvovannogo metoda diagnostirovaniya defektov rotornoj obmotki asinkhronnykh dvigatelei. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Korolevskie chteniya»* (Samara 03-05 Okt 2017.). Samara: Izdatel'stvo Samarskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta imeni akademika SP.Koroleva, 2017.pp 495-497.

#### **Authors of the publication**

**Vladimir I. Polishchuk** – Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. Email: polischuk\_vi@mail.ru.

**Mikhail V. Kritsky** – Samara State Technical University, Samara, Russia.

**Dmitrii M. Bannov** – Samara State Technical University, Samara, Russia.

**Sergei V. Malyshev** – Samara State Technical University, Samara, Russia.

*Поступила в редакцию*

*24 октября 2019г.*