

A DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF TURN-TO-TURN FAULTS AND BEARINGS DEFECTS OF INDUCTION ELECTRIC MOTORS

O. V. Sokolova¹, I. S. Sokolov²

¹ — Transbaikal Institute of Railway Transport – a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, Russian Federation

² — Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

The problem of induction electric motors diagnostics is considered in the paper. Now many methods of induction motors diagnostics are developed. They are based on analyzing the vibrations of the electric motor elements, acoustic vibrations of the running electric motor, magnetic flux in the engine gap, secondary electromagnetic fields of the machine, temperature of the machine separate elements, work and condition of the mechanical knots, iron content in oil, isolation condition, electric and others machine parameters. Turn-to-turn faults in stator winding remain ones of the most widespread malfunctions. This malfunction is difficult to define at early stage. The electric motor is less exposed to damage at early detection of this malfunction. The researchers have proved that turn-to-turn faults in the stator winding have to be defined immediately even at small damage.

The engine can keep running but the fault will increase and cause heating in the damaged turns. Therefore the existence of turn-to-turn faults in the stator winding has to be timely defined. The developed diagnostics methods of turn-to-turn faults of induction engines, for example, Park's vector approach, a research of magnetic flux or spectral analysis of rotating engine allow us to find the defect already at a late stage of the fault development.

The device of induction engines diagnostics for defining the turn-to-turn faults at early stage of malfunctions is offered. The electric motor diagnostics can be test and functional. The device allows us to determine turn-to-turn faults by the number of engine speed and time of his running-out. The device has a number of advantages, such as expanded functionality, increased accuracy and reliability, electrical safety. The offered device allows us to protect the electric motor from negative impact of turn-to-turn faults and prolong the term of his trouble-free operation.

Keywords: induction electric motors, diagnostics, turn-to-turn faults, stator winding, quantity of turns, running-out time.

For citation:

Sokolova, Olga V., and Ivan S. Sokolov. "A device for diagnostics of turn-to-turn faults and bearings defects of induction electric motors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 592–599. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-592-599.

УДК 621.313.333

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ И ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

О. В. Соколова¹, И. С. Соколов²

¹ — Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «ИрГУПС», Чита, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», Чита, Российская Федерация

В статье рассматривается проблема диагностики асинхронных электродвигателей. Отмечается, что в настоящее время разработан ряд методов диагностики асинхронных двигателей, основанных на анализе вибраций элементов электродвигателя, акустических колебаний работающего электродвигателя, магнитного потока в зазоре двигателя, вторичных электромагнитных полей машины, температуры отдельных элементов машины, работы и состояния механических узлов, состояния изоляции, электрических и других параметров машины, но при этом подчеркивается, что межвитковые замыкания в обмотке статора остаются одной из самых распространенных и трудно выявляемых на ранней стадии неисправностей.

Исследователями доказано, что даже при небольшом дефекте межвитковые замыкания в обмотке статора нужно незамедлительно определять, так как двигатель может продолжать работать, но дефект будет увеличиваться и вызывать нагревание в этих витках. Разработанные методы диагностики межвитковых замыканий асинхронных двигателей, например, векторный подход Парка, исследование магнитного потока или спектральный анализ вращающегося двигателя, позволяют обнаружить дефект уже на поздней стадии развития.

Предложено устройство диагностики асинхронных двигателей для определения межвитковых замыканий и дефектов подшипников асинхронных электродвигателей на ранней стадии неисправностей, которое позволяет определять межвитковые замыкания по количеству оборотов двигателя и дефекты подшипников по его времени выбега. Преимуществами устройства являются: расширение функциональных возможностей, включающее косвенное определение наличия межвитковых замыканий обмоток статора, дефектов межвитковых замыканий и повышение электробезопасности за счет развязки сигналов блока питания с сетью. Данное устройство позволяет своевременно определить наличие межвитковых замыканий статора и дефектов подшипников и в результате защитить электродвигатель от их негативного воздействия, а также продлить срок его безаварийной работы.

Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, диагностика, межвитковые замыкания, обмотка статора, количество оборотов, время выбега.

Для цитирования:

Соколова О. В. Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников асинхронных электродвигателей / О. В. Соколова, И. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 592–599. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-592-599.

Введение (Introduction)

Широкое применение асинхронных трехфазных электродвигателей на судах, верфях, в портах, на судостроительных заводах и во многих хозяйствах водного транспорта связано с эксплуатацией электродвигателей в условиях повышенной влажности. В таких условиях многие неисправности электродвигателей быстро прогрессируют и выводят из строя электродвигатели даже с небольшим сроком эксплуатации. Своевременное и точное определение неисправности сокращает сроки ремонта и уменьшает непредвиденные расходы. Качественная и быстрая диагностика состояния электродвигателей также нужна на подготовительном этапе ремонта электрического оборудования судов для объективного определения вида и объема предстоящих работ.

В настоящее время разработан ряд методов диагностики асинхронных двигателей, основанных на анализе вибрации элементов электродвигателя, акустических колебаний работающего электродвигателя, магнитного потока в зазоре двигателя, вторичных электромагнитных полей машины, температуры отдельных элементов машины, работы и состояния механических узлов, содержания железа в масле, состояния изоляции, электрических параметров машины и др. [1]. Анализ существующих методов технической диагностики электродвигателей показывает, что существуют два направления в развитии. К первому направлению относятся методы, связанные с прерыванием технологического процесса или заменой электродвигателя, осуществляемые при проведении профилактических испытаний и ремонтов и позволяющие выявлять практически все возможные виды дефектов. Ко второму направлению относятся методы диагностики работающих электродвигателей при непрерывном технологическом процессе. Изучение этого вопроса показало, что несмотря на все достоинства методов диагностирования неисправностей электродвигателя, в каждом из них существуют недостатки, в связи чем открытым остается вопрос о разработке системы диагностики [2]–[4].

Среди существующих методов наиболее широко используется *метод вибродиагностики*, основанный на измерении и анализе спектральных характеристик вибрации. По информативности ему не уступает метод, основанный на анализе спектральных характеристик фазных токов, однако диагностические приборы не имеют широкого распространения [5]. Это же касается и разработанной автоматизированной системы контроля технического состояния трехфазных асинхронных электродвигателей, и многоканальной системы мониторинга асинхронных электродвигателей [6], [7].

Функциональная диагностика электродвигателя направлена на анализ состояния электродвигателя. Наиболее часто встречающимися и трудно выявляемыми на ранней стадии неисправностями электродвигателей являются межвитковые замыкания в обмотках статора. При такой неисправности электродвигатель может продолжать работать, но его состояние постепенно ухудшается, что неизбежно приведет к дефектам, требующим его перемотки или замены. Поэтому диагностика межвитковых замыканий в обмотках статора очень важна, особенно на ранних стадиях развития. Группой авторов в Забайкальском государственном университете разработаны способы диагностики межвитковых замыканий асинхронных электродвигателей [8], [9]. Учитывая широкое распространение указанной неисправности и важность ее диагностики, считаем необходимым продолжить проработку этого вопроса.

Целью работы является создание устройства диагностики межвитковых замыканий обмоток статора асинхронного электродвигателя для быстрого определения неисправности. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить наиболее часто возникающие неисправности асинхронных электродвигателей;
- изучить методы их диагностики;
- разработать устройство функциональной диагностики наиболее часто возникающих неисправностей асинхронных электродвигателей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследования характера дефектов электродвигателей переменного тока показали, что большую часть дефектов составляют дефекты элементов подшипников (около 40 %) и элементов статора (около 38 %) [10], при этом дефекты межвитковых замыканий обмоток статора составляют около 15 % от общего числа неисправностей.

Дефекты элементов подшипников относятся к механическим, и их наличие определяется методами вибродиагностики, тепловизионного контроля и др. Межвитковые замыкания обмоток статора относятся к электрическим дефектам асинхронных двигателей и определяются с помощью векторного подхода Парка, исследования магнитного потока, спектрального анализа вращающегося двигателя и др. Эти методы позволяют обнаружить дефекты электродвигателя на поздней стадии развития. При разработке устройства основными характеристиками, позволяющими определить наличие наиболее часто встречающихся дефектов, были выбраны время выбега электродвигателя и частота его вращения, определяемая с помощью тахогенератора. При наличии указанных ранее дефектов количество оборотов в минуту не соответствует номинальной характеристике двигателя, а время выбега позволяет определить наличие дефектов подшипников.

Результаты (Results)

Разработанное устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя используется для одновременного определения дефектов, связанных с межвитковыми замыканиями и дефектов подшипников как наиболее часто встречающихся неисправностей. Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя показано в виде полной принципиальной развернутой схемы (рис. 1). Функциональная схема устройства содержит:

- блок датчика;
- пуско-остановочный блок;
- блок питания;
- блок совместимости;
- блок измерения времени выбега;
- блок измерения количества оборотов двигателя.

Блок датчика *I* предназначен для формирования сигнала при вращении двигателя и его остановки. Блок состоит из тахогенератора *BR* и переключателя *BK* для изменения полярности

вырабатываемого напряжения в зависимости от направления вращения испытываемого электродвигателя *M*.

Пуско-остановочный блок 2 предназначен для согласования силовых электрических сигналов с управлением электродвигателя *M* для согласования с малоточной электроникой 4 этого блока, а также для обеспечения безопасности обслуживающего персонала и четкости управляющего сигнала. Блок состоит из неполярного конденсатора *C1*, герконового реле *R1*, выпрямительного моста *VD1*, полярного конденсатора *C2*, стабилитрона *V1*, диода *V2* и герконового реле *P1*. Неполярный конденсатор *C1* является балластным и предназначен для снижения действующего напряжения до величины, необходимой для работы герконового реле *R1*, которое ограничивает величину тока. Полярный конденсатор *C2* сглаживает пульсации напряжений, прошедших через выпрямительный мост *VD1*. *V1* стабилизирует напряжения до величины, приемлемой для питания герконового реле *P1*, обеспечивающего своевременное включение и выключение таймера блока измерения времени выбега 5.

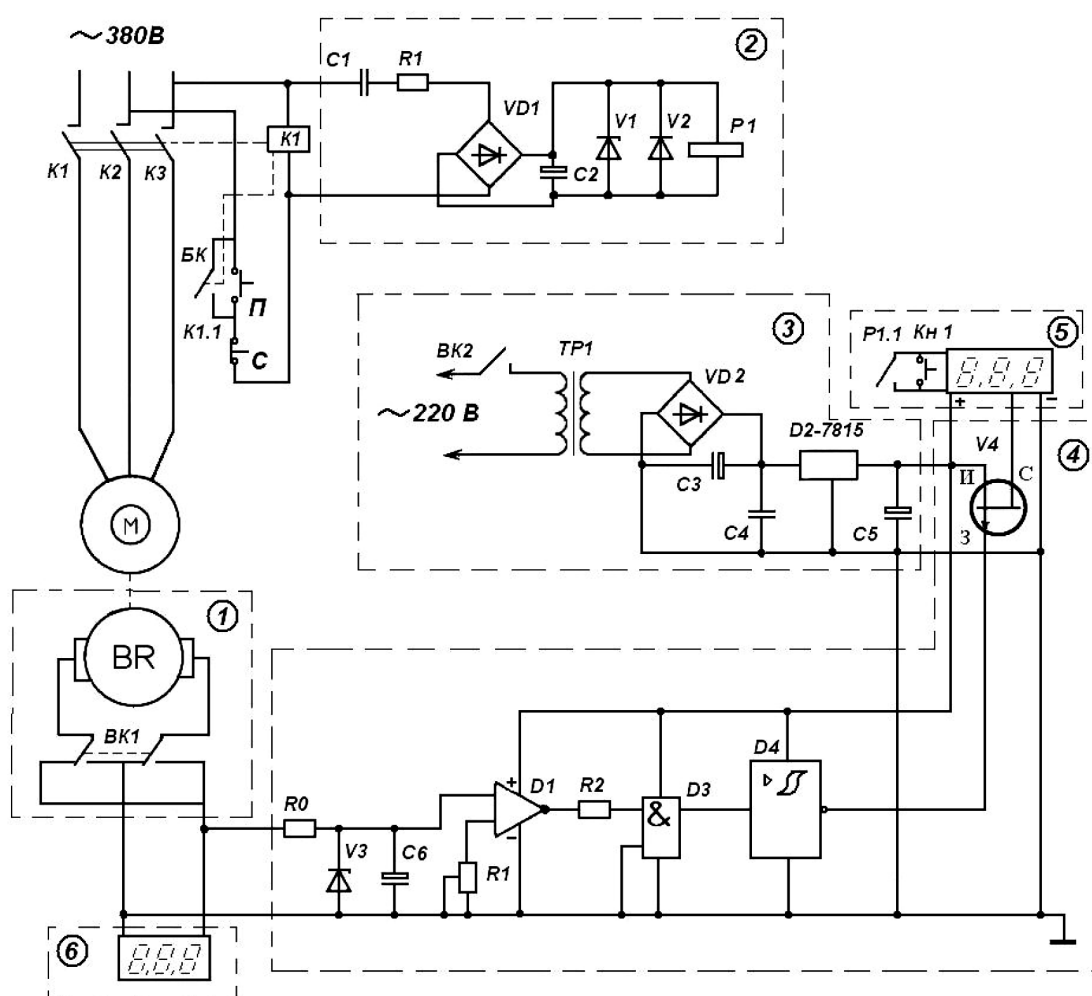


Рис. 1. Полная принципиальная развернутая схема рассматриваемого устройства

Блок питания 3 обеспечивает питание блока совместимости 4, блока измерения времени выбега 5 и блока измерения количества оборотов двигателя 6. Данный блок состоит из понижающего трансформатора *TP1*, выпрямительного моста *VD2*, полярного конденсатора *C3* и *C5*, неполярного конденсатора *C4* и стабилизатора напряжения *D2-7815*. Блок питания 3 подключен к сети напряжением 220 В. Проходя через понижающий трансформатор *TP1*, входное напряжение снижается до 20 В, затем выпрямляется с помощью *VD2*, сглаживается конденсаторами *C3*, *C4*,

регулируется с помощью стабилизатора напряжения D2-7815 и фильтруется полярным конденсатором $C5$, таким образом на выходе получаем напряжение 15 В, необходимое для работы трех перечисленных блоков.

Блок совместимости 4 обеспечивает совместимость датчика с электроникой и формирует сигнал включения и выключения таймера в нужное время. Он состоит из резисторов $R0, R1, R2$, стабилитрона $V3$, полярного конденсатора $C6$, компаратора $D1$, полевого транзистора $V4$, логического элемента $D3$ и триггера Шмитта $D4$.

Ток стабилитрона $V3$ ограничивается резистором $R0$. Пульсация напряжения сглаживается полярным конденсатором $C6$. Регулировка чувствительности компаратора $D1$ обеспечивается резистором $R1$, резистор $R2$ является согласующим сопротивлением аналогового сигнала компаратора $D1$ с логическим элементом $D3$ и триггером Шмитта $D4$. При включенном электродвигателе M полевой транзистор $V4$ закрыт, и таймер блока измерения времени выбега 5 не производит отсчет. После отключения двигателя M полевой транзистор $V4$ открывается и происходит отсчет времени выбега электродвигателя M до его полной остановки.

Блок измерения времени выбега 5 предназначен для визуального определения времени выбега электродвигателя с точностью до 0,1 с. Он состоит из таймера, контактов $P1.1$ и кнопки $Kn1$. Замер времени начинается с момента отключения электродвигателя до его полной остановки. В течение небольшого промежутка времени напряжение уменьшается до нуля, что соответствует полной остановке двигателя (рис. 2).

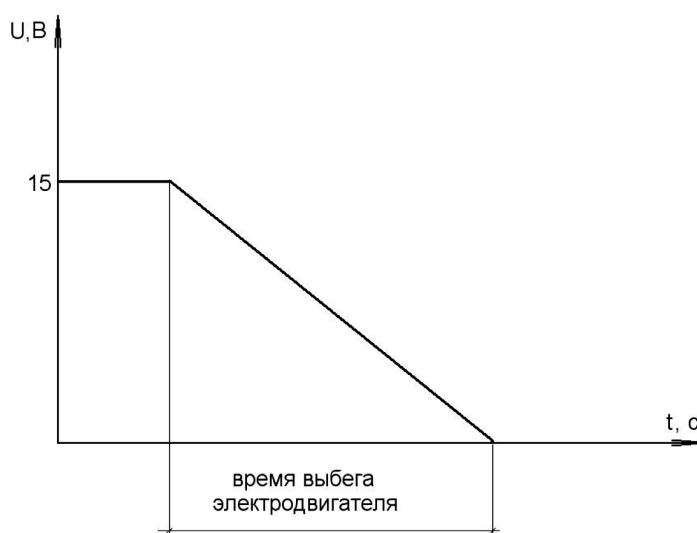


Рис. 2. График функции изменения величины напряжения от времени

Блок измерения количества оборотов двигателя 6 предназначен для определения количества оборотов двигателя. Он состоит из цифрового тахометра, который непосредственно связан с тахогенератором BR для определения количества оборотов двигателя.

Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя работает следующим образом. При нажатии кнопки ПУСК запускается испытуемый электродвигатель M , срабатывает $P1$, и контакты замыкаются, происходит обнуление таймера до отключения двигателя. Триггер Шмитта воспринимает входной сигнал. На выходе Триггера Шмитта сигнал 1 поступает на затвор, открывая его, при этом происходит разрешение счета, но так как контакты реле $P1.1$ замкнуты, счета не происходит. После включения двигателя $M1$ он должен набрать максимальное число оборотов, которое контролируется по тахометру, после достижения максимальных оборотов электродвигатель $M1$ отключается кнопкой СТОП — C , пускатель $K1$ обесточивается и отключается реле $P1$, контакты $P1.1$ размыкаются, раз-

решая работу таймера, он начинает подсчитывать время свободного выбега. После остановки электродвигателя *M1* сигнал с тахогенератора *BR* пропадает. Триггер Шмитта *D4* с помощью транзистора *I4* открывает напряжение. Происходит запрет счета таймера, показания таймера можно считать.

Обсуждение (Discussion)

Многочисленные исследования характера дефектов двигателей переменного тока позволили получить следующие статистические данные [10]:

- дефекты элементов статора — 38 %;
- дефекты элементов ротора — 10 %;
- дефекты элементов подшипников — 40 %;
- другие дефекты — 12 %.

Эти статистические данные у разных авторов имеют различные значения, но все исследователи придерживаются одного мнения о том, что наиболее часто встречаются дефекты подшипников и элементов статора.

Основные требования, предъявляемые к устройствам и способам диагностики:

- достоверность;
- функциональность;
- простота;
- при необходимости, дистанционность;
- возможность аналитической обработки результатов;
- возможность не прерывания производственного процесса.

Предлагаемое устройство разработано в целях своевременного обнаружения дефектов асинхронных электродвигателей, связанных с межвитковыми замыканиями обмоток статора и дефектами элементов подшипников. Диагностика с помощью предлагаемого устройства позволяет избежать дальнейшего развития негативных процессов, уменьшить время восстановления электродвигателя, сократить затраты на ремонт, сократить простои оборудования, повысить эффективность работы двигателя. Диагностика с помощью предложенного устройства отличается электробезопасностью, функциональностью и простотой, при этом охватывает наиболее часто встречающиеся дефекты. Устройство не отвечает требованиям дистанционности и для проведения диагностики имеется необходимость выключения двигателя на очень непродолжительный промежуток времени, составляющий всего несколько минут.

Заключение (Conclusion)

Как доказала мировая практика, внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования во всех отраслях производства. Предложенное устройство диагностики асинхронных электродвигателей может применяться на судах и во всех хозяйствах водного транспорта, так как оно позволяет определять наличие неисправности в подшипниках по времени выбега и наличию межвитковых замыканий обмоток статора без предварительной разборки электродвигателя и ускоряет определение перечисленных неисправностей.

Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя предназначено для комплексной диагностики электродвигателя и применяется для одновременного определения дефектов различных частей двигателя. Преимуществами устройства являются:

- расширенные функциональные возможности, включающие косвенное определение наличия межвитковых замыканий обмоток статора и дефектов подшипников;
- повышенная электробезопасность за счет развязки сигналов блока питания с сетью, что является немаловажным фактором при применении устройства в условиях повышенной влажности на судах и в хозяйствах водного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидельников Л. Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л. Г. Сидельников, Д. О. Афанасьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2013. — Т. 12. — № 7. — С. 127–131.
2. Бахарев А. В. Анализ методик оценки технического состояния электродвигателя / А. В. Бахарев, А. Д. Умурзакова // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2017. — С. 402.
3. Babaa F. Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines / F. Babaa, A. Khezzar, M. el kamel Oumaamar // *Frontiers in Energy*. — 2013. — Vol. 7. — Is. 3. — Pp. 271–278. DOI: 10.1007/s11708-013-0258-6
4. Mazzoletti M. A. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM / M. A. Mazzoletti, G. R. Bossio, C. H. De Angelo, D. R. Espinoza-Trejo // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2017. — Vol. 64. — Is. 9. — Pp. 7218–7228. DOI: 10.1109/TIE.2017.2688973
5. Жарков В. В. Метод диагностирования асинхронных электродвигателей и устройство для его реализации / В. В. Жарков, В. И. Смирнов, Д. В. Чернов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. — 2004. — № 3. — С. 39–44.
6. Марданов Р. Р. Автоматизированная система контроля технического состояния асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором: дис. ... канд. техн. наук; спец: 05.11.13 / Р. Р. Марданов. — Казань: Казанский государственный энергетический ун-т, 2013. — 149 с.
7. Пустахайлов С. К. Разработка многоканальной системы мониторинга асинхронных электродвигателей электростанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. К. Пустахайлов. — Ставрополь: Северо-Кавказский государственный технический ун-т, 2006. — 179 с.
8. Пат. 2529596 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/06. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя / И. Ф. Суворов, Р. В. Горбунов, Г. А. Палкин, Д. В. Коряков; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет». — № 2013110594; заявл. 11.03.2013; опубл. 27.09.2014; Бюл. № 27. — 8 с.
9. Пат. 2537518 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/06. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя / И. Ф. Суворов, Р. В. Горбунов, Г. А. Палкин, Д. В. Коряков; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет». — № 2013110600; заявл. 11.03.2013; опубл. 10.01.2015; Бюл. № 1. — 6 с.
10. Петухов В. С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. С. Петухов, В. А. Соколов // *Новости Электротехники*. — 2005. — № 1 (31). — С. 23–28.

REFERENCES

1. Sidel'nikov, L. G., and D. O. Afanas'ev. "Control methods review of induction motors technical state during operation." *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering* 12.7 (2013): 127–137.
2. Bakharev, A. V., and A. D. Umurzakova. "Analiz metodik otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrodvigatelya." *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika: materia-ly III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kemerovo: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2017. 402.
3. Babaa, Fatima, Abdelmalek Khezzar, and Mohamed el kamel Oumaamar. "Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines." *Frontiers in Energy* 7.3 (2013): 271–278. DOI: 10.1007/s11708-013-0258-6
4. Mazzoletti, Manuel A., Guillermo R. Bossio, Cristian H. De Angelo, and Diego R. Espinoza-Trejo. "A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64.9 (2017): 7218–7228. DOI: 10.1109/TIE.2017.2688973
5. Zharkov, V.V., V.I. Smirnov, and D.V. Chernov. "Metod diagnostirovaniya asinkhronnykh elektrodvigatelyi i ustroystvo dlya ego realizatsii." *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3 (2004): 39–44.
6. Mardanov, R.R. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh elektrodvigatelyi s korotkozamknutym rotorom. PhD diss. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2013.

7. Pustakhailov, S.K. Razrabotka mnogokanal'noi sistemy monitoringa asinkhronnykh elektrodvigateli elektrostantsii. PhD diss. Stavropol': Severo-Kavkazskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006.

8. Suворov, I.F., R.V. Gorbunov, G.A. Palkin, and D.V. Koryakov. RU 2 529 596, IPC G 01 R 31/06. Sposob diagnostiki mezhvitkovykh замыканий asinkhronnogo elektrodvigatelya. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Sept. 2014.

9. Suворov, I.F., R.V. Gorbunov, G.A. Palkin, D.V. Koryakov. RU 2 537 518, IPC G 01 R 31/06. Sposob diagnostiki mezhvitkovykh замыканий asinkhronnogo elektrodvigatelya. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Jan. 2015.

10. Petukhov, V.S., and V.A. Sokolov. "Diagnostika sostoyaniya elektrodvigateli. Metod spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka." *Novosti Elektrotehniki* 1(31) (2005): 23–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколова Ольга Владимировна —

кандидат технических наук, доцент
Забайкальский институт железнодорожного
транспорта – филиал ФГБОУ ВО «ИрГУПС»
672040, Российская Федерация, г. Чита,
ул. Магистральная, 11
e-mail: sokolova.olga1963@mail.ru

Соколов Иван Сергеевич —

ассистент
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный
университет»
672039, Российская Федерация, г. Чита,
ул. Александрo-Заводская, 30
e-mail: ivan.sokolov1992@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolova, Olga V. —

PhD, associate professor
Transbaikal Institute of Railway Transport –
branch of Irkutsk State Transport University
11 Magistral'naya Str., Chita, 672040,
Russian Federation
e-mail: sokolova.olga1963@mail.ru

Sokolov, Ivan S. —

Assistant
Transbaikal State University
30 Aleksandro-Zavodskaya Str., Chita, 672039,
Russian Federation
e-mail: ivan.sokolov1992@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 марта 2019 г.

Received: March 11, 2019.