

УДК 621.313.32

**Р.О. Токарев<sup>1</sup>, В.В. Шапошников<sup>1</sup>, Е.А. Чабанов<sup>1,2</sup>, Е.В. Чабанова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия<sup>2</sup>Волжский государственный университет водного транспорта  
(Пермский филиал), Пермь, Россия

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Методы диагностики электрических машин набирают огромную популярность и значимость. Не все предприятия могут производить постоянную модернизацию своего оборудования по причине нехватки денежных средств. Они вынуждены снижать бюджет на переоборудование и использовать в работе машины, которые давным-давно нуждаются в ремонте. Любая электрическая машина даже при должном уходе требует ремонта. Если не производить ремонт вовремя, то могут возникать аварийные ситуации, опасные для жизни обслуживающего персонала, а также они могут привести к внеплановым ремонтам и простоям на производстве. Решая данную проблему, прибегают к постоянной оценке технического состояния машины. Плюсом такого решения является то, что задолго до поломки оборудования есть возможность выявления дефекта в машине и исправления его. В статье рассматривается реализация одного из методов такой оценки, проводимой путем спектрального анализа токов статора синхронной машины. Мгновенные значения токов статора подвергаются разложению в гармонический ряд с помощью коэффициентов ряда Фурье. Анализ спектра позволяет утверждать, что любая дополнительная гармоника обуславливают явную неисправность в машине. Этот метод позволяет быстро и с высокой точностью определять дефекты как в электрической, так и в механической части машины. Такой подход отличается также большей объективностью, чем другие методы. Преимущество данной методики в том, что она была уже апробирована на асинхронной машине и дала хорошие результаты. Объектом исследования был выбран синхронный турбогенератор серии ТТК-50-2УЗП.

**Ключевые слова:** синхронная машина, мгновенные значения тока, преобразование Фурье, коэффициенты разложения, спектральный анализ, амплитудный спектр, фазовый спектр, оценка технического состояния, внезапное симметричное короткое замыкание, диагностика неисправностей.

**R.O. Tokarev<sup>1</sup>, V.V. Shaposhnikov<sup>1</sup>, E.A. Chabanov<sup>1,2</sup>, E.V. Chabanova<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Perm national research polytechnic university, Perm, Russian Federation<sup>2</sup>Volga State University of Water Transport (Perm branch), Perm, Russian Federation

## SPECTRAL ANALYSIS OF SYNCHRONOUS MACHINE FAULTS

The methods of diagnostics of electric machines are gaining immense popularity and significance. Not all enterprises can continuously upgrade their equipment due to lack of funds. They are forced to reduce the budget for re-equipment and use the machines that long ago need repair. Any electric machine, even with proper care, requires repair. If you do not perform repairs on time, then

there may be emergencies that are life-threatening for maintenance personnel. Solving this problem, they resort to a constant assessment of the technical condition of the machine. The article deals with the implementation of one of the methods of such the estimation, carried out by spectral analysis of the stator current of a synchronous machine. The instantaneous values of the stator currents are decomposed into a harmonic series by means of the coefficients of the Fourier series. Analysis of the spectrum allows us to state that any additional harmonic causes a clear fault in the machine. This approach is as much more objective than other methods. The advantage of this technique is that it was already tested on an asynchronous machine and produced good results. The synchronous turbine generator of the TTK-50-2U3P series was selected for the study.

**Keywords:** synchronous machine, instantaneous value of currents, Fourier transformation, expansion coefficients, spectral analysis, amplitude spectrum, phase spectrum, assessment of technical condition, sudden symmetrical short circuit, fault diagnosis.

В настоящее время во всем мире электрическая энергия в силу своей универсальности играет важнейшую роль в жизни каждого человека. Электрические машины являются на данный момент основными источниками электрической энергии, поэтому занимают в этой области одну из основных ролей. Почти все виды электрических машин были уже сконструированы и изучены еще в прошлом веке, поэтому сегодня встает важная задача обеспечения надежности этих машин и увеличения срока службы без особых вмешательств в конструкцию. Чем больше срок службы каждой машины, тем меньше предприятие тратит средств на ремонт и переоснащение.

Проблема обеспечения высокой надежности работы электрических машин с каждым годом становится все более актуальной как во всем мире, так и в России, потому что оборудование стареет и приходит в негодность значительно быстрее темпа технического перевооружения.

Не все предприятия на сегодняшний день могут производить постоянный ремонт и модернизацию своего задействованного оборудования, из-за ограничения денежных средств они вынуждены снижать бюджет на ремонт оборудования.

Существует способ для решения этой проблемы – периодическая оценка технического состояния машины, которая стала возможна с развитием методов текущего контроля [1]. Плюсом такого решения является то, что задолго до поломки оборудования есть возможность выявления дефекта в машине и исправления его. В таком случае на производстве не произойдет внезапный выход из строя двигателя, что не вызовет тем самым аварийную ситуацию, опасную для жизни обслуживающего персонала [2].

Методы контроля делятся на разрушающие и неразрушающие. Разрушающие методы контроля проводят для определения предела

прочности и надежности исследуемого объекта. Данные методы позволяют контролировать качество материала конструкции и элементов, получать информацию для прогнозирования ресурса их безопасной эксплуатации. Разрушающий контроль прямо противоположен неразрушающим методам.

Преимущество разрушающего контроля в том, что он позволяет получать количественные показатели материалов. В основном разрушающий контроль проходит до полной невозможности дальнейшего использования исследуемого объекта.

К разрушающим методам относятся динамические испытания, такие как изгиб, повышенная и пониженная температура, а также испытания на вибропрочность, на ударную прочность.

В процессе контроля можно определить важные параметры, необходимые для дальнейшего его использования, например, максимальная устойчивость к механическим воздействиям, максимальная рабочая температура.

С целью получения более углубленных знаний об испытуемом объекте часто разрушающие методы совмещают с неразрушающими методами контроля.

Неразрушающие методы контроля служат для определения работоспособности машины [3]. Можно измерить многие десятки параметров, однако для таких исследований необходимо большое число приборов, необходимый запас средств и времени, что может свести эффективность диагностирования к минимуму и даже привести к убыткам предприятия [4, 5, 6]. Поэтому из всего диапазона параметров выбирают более подходящие и экономичные с точки зрения удобства, достижения нужного результата при минимальных затратах [4, 5, 6].

Выбор метода контроля зависит напрямую от свойств и параметров контролируемого объекта и условий его обследования.

При любом методе неразрушающего контроля о наличии дефектов судят по косвенным признакам [7]. Характеристики, измеряемые при выявлении дефекта любым выбранным методом, образуют измеряемые характеристики [1].

Характеристику, с которой сравнивают измеряемую и судят о наличии дефекта, называют главной измеряемой характеристикой.

К методам неразрушающего контроля относятся:

– акустические методы контроля;

- вибрационные методы контроля;
- виброакустический метод;
- вихревые методы контроля;
- капиллярный метод контроля;
- магнитные методы контроля;
- тепловые методы контроля;
- радиационные методы контроля;
- электрические методы контроля;
- оптические методы контроля.

Из предложенного ряда методов рассмотрим наиболее интересные и часто применяемые методы контроля.

С каждым днем разрабатываются новые методы оценки состояния электрической машины. Одним из таких методов является спектральный анализ токов статора рабочей машины, он относится к электрическому методу неразрушающего контроля. Этот метод позволяет быстро и с большой точностью определять дефекты как в электрической, так и в механической части машины [8, 9].

Суть метода заключается в том, что любое возмущение в работе машины напрямую будет влиять на ток статора рабочей машины, а, значит, и на спектр получаемого сигнала. Соответственно, наличие в спектре машины гармонических составляющих на частоте определенной величины будет свидетельствовать о наличии повреждения.

Плюс этого метода, в отличие от метода вибродиагностики [10], в том, что мониторинг тока двигателя выполняется непосредственно на коробе машины, без вмешательств в его режим работы, так же, как и в электроците питания. Мониторинг тока статора является весьма удобным методом для машины без ее остановки в отличие от существующих методов [11, 12]. Признаки нарушения ее внешней или внутренней симметрии будут видны в спектре тока.

В данной статье рассматривается применение метода спектрального анализа переходных процессов в опытах внезапного симметричного короткого замыкания на синхронном турбогенераторе серии ТТК-50-2УЗ-П [13–18]. Турбогенератор с трубчатым корпусом серии ТТК предназначен для выработки электроэнергии при сопряжении с паровой (П) или газовой (Г) турбиной.

Опыт ВКЗ генератора – процесс, в результате которого в машине создается переходный процесс, устанавливающий новое значение на-

пряжения на обмотке статора. Исследования, проведенные в данной статье, позволяют на конкретном примере рассмотреть техническое состояние рабочей машины в данный момент времени и выявить ее дефекты, если такие присутствуют. Полученные мгновенные значения тока статора фазы «А» и «В» подвергаются разложению в гармонический ряд с использованием коэффициентов ряда Фурье.

Коэффициенты разложения ряда Фурье определяются в виде обобщённых формул:

$$a_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} f(i) \cdot \cos \frac{k\pi i}{N}, \quad (1)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} f(i) \cdot \sin \frac{k\pi i}{N}, \quad (2)$$

где  $N, K$  – количество мгновенных значений исследуемого тока в опыте ВКЗ,  $i$  – текущее мгновенное значение тока в опыте ВКЗ.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}, \quad (4)$$

где  $\omega_1 = 2\pi fn$  – основная частота (частота первой гармоники);  $n = 1, 2, 3, \dots$

Амплитуды гармоник  $A_n$  характеризуют амплитудный спектр, а начальные фазы  $\varphi_n$  – фазовый спектр. Для математической обработки сигналов применялись средства программного пакета LabView [19].

LabView представляет собой мощную и гибкую среду графического программирования, которая широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами. На рис. 1 представлена программа, разработанная для получения амплитудного и фазового спектров переходных процессов исследуемой машины. На рис. 2 и 3 представлены временные диаграммы мгновенных значений тока переходного процесса синхронной машины в опыте ВКЗ, в результате обработки которых были получены амплитудный (рис. 4 и 6) и фазовый (рис. 5 и 7) спектры фаз «А» и «В».

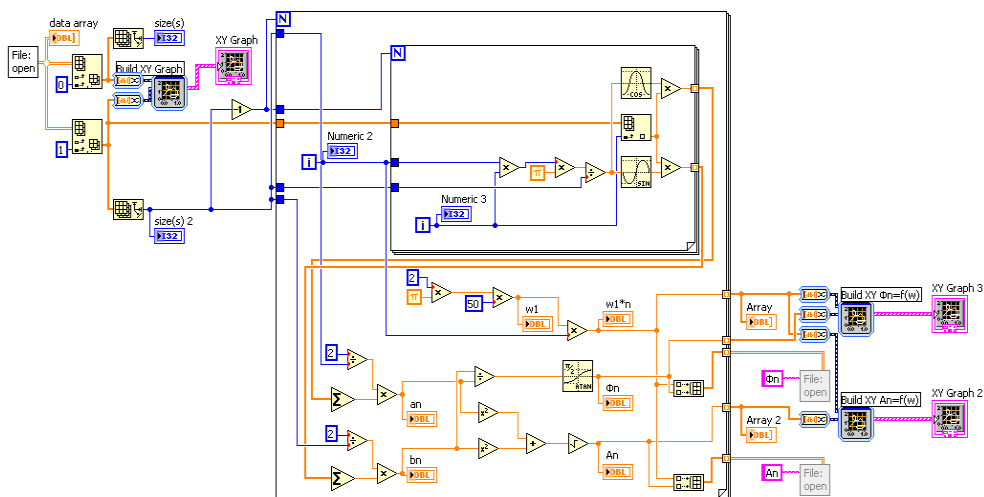


Рис. 1. Программная реализация метода спектрального анализа

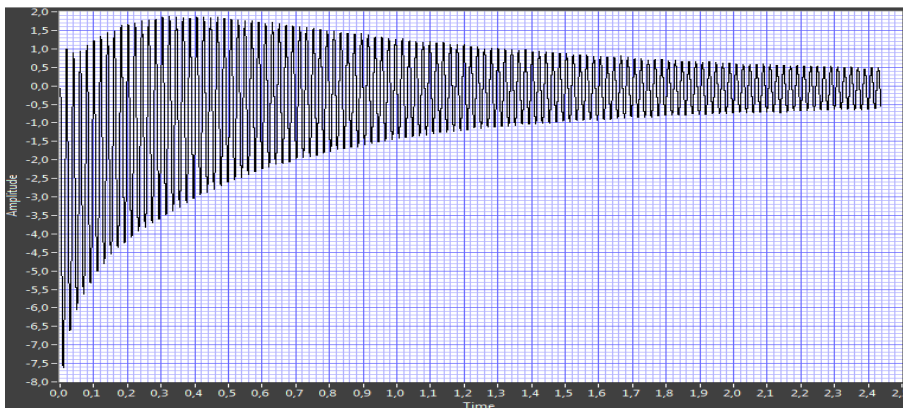


Рис. 2. Временная диаграмма мгновенных значений тока фазы «А» в опыте ВКЗ

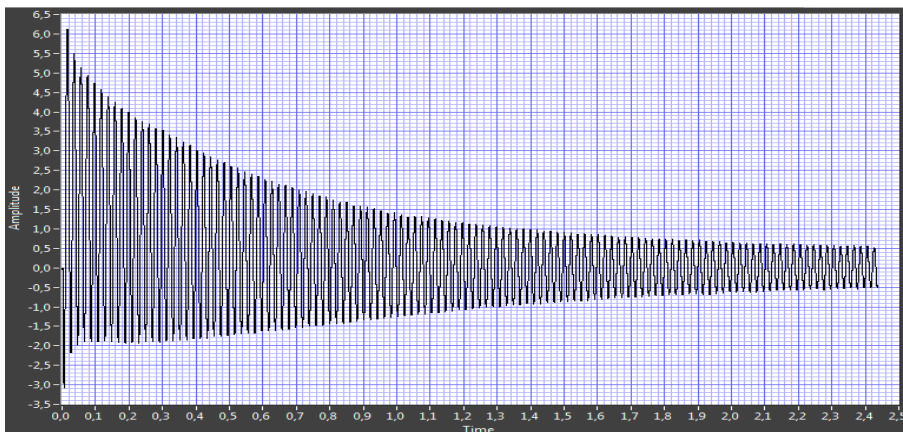


Рис. 3. Временная диаграмма мгновенных значений тока фазы «В» в опыте ВКЗ

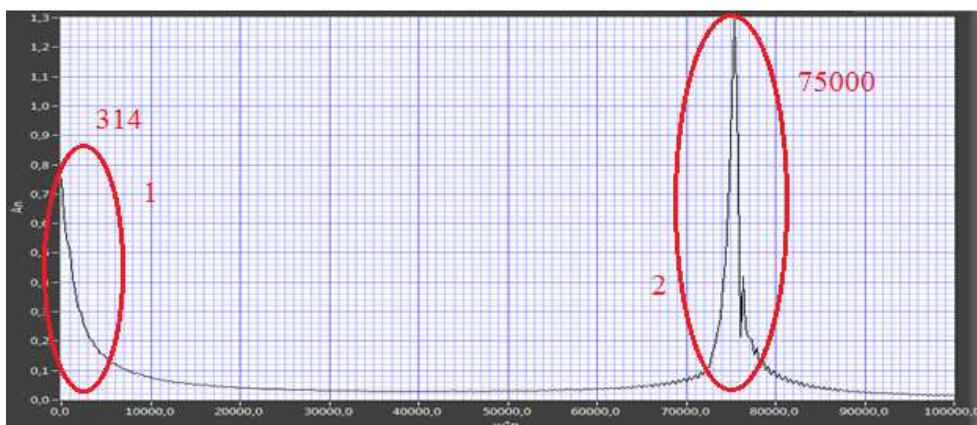


Рис. 4. Амплитудный спектр тока фазы «А» в опыте ВКЗ

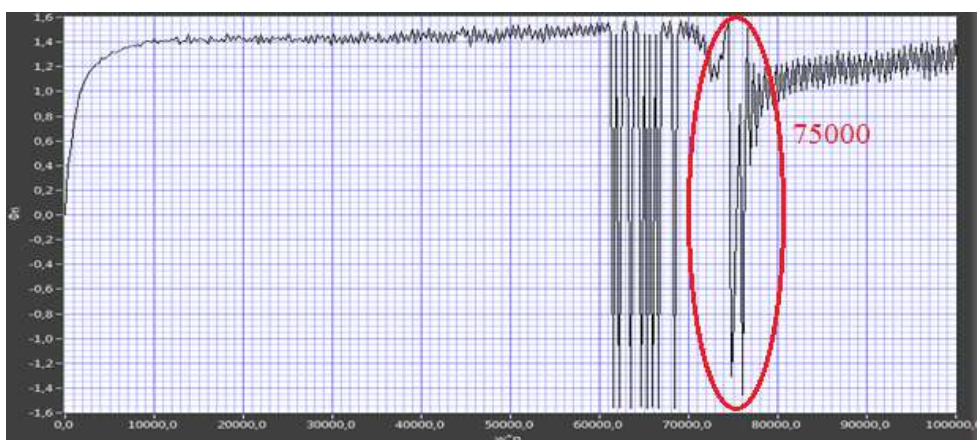


Рис. 5. Фазовый спектр тока фазы «А» в опыте ВКЗ



Рис. 6. Амплитудный спектр тока фазы «В» в опыте ВКЗ



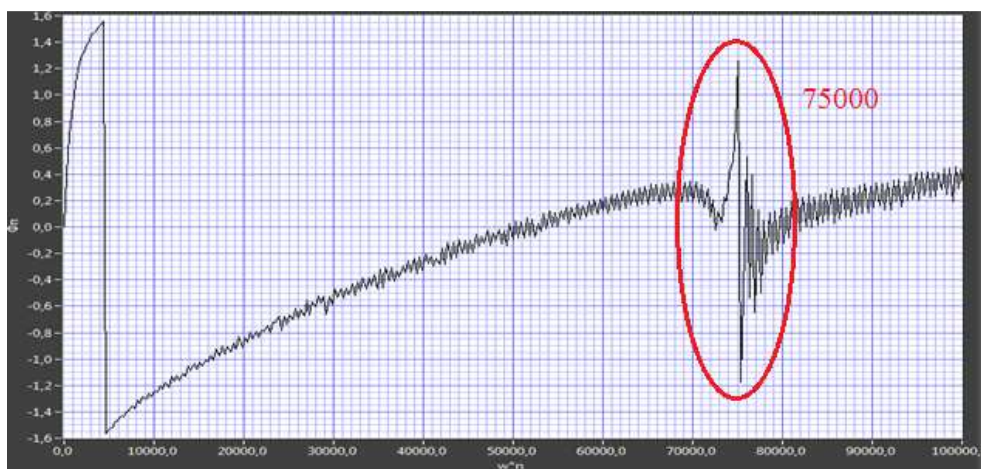


Рис. 7. Фазовый спектр тока фазы «В» в опыте ВКЗ

На амплитудных спектрах обеих фаз прослеживается явная закономерность, а именно:

1) присутствует гармоническая составляющая большой амплитуды на частоте 314 рад/с (область 1), что соответствует основной несущей частоте (при тактовой частоте сигнала  $f = 50$  Гц, циклическая  $\omega = 314$  рад/с);

2) второй скачок наблюдается на частоте 75 000 рад/с. Поскольку скачки гармоник на фазах наблюдаются на одной и той же частоте, то это может указывать на дефекты в машине, которые относятся ко всем фазам одновременно, а не по отдельности к каждой.

Анализ фазовых спектров сигнала в отдельности показал, что дополнительные гармоники, созданные дефектом машины, находятся на одной и той же частоте.

Оценка технического состояния синхронной машины по анализу амплитудного и фазового спектров является еще неразвитой, поэтому не накоплен достаточный опыт для того, чтобы сделать точное заключение по ее дефекту. Предполагается, что дефект связан с ротором синхронной машины (его механической или электрической частью) [20, 21].

Исследования по данной тематике следует продолжить другими способами для подтверждения выдвинутой гипотезы. В результате этих исследований будут определены соответствия возникающих на спектре дополнительных гармоник с вызвавшими их неисправностями синхронной машин.



### **Библиографический список**

1. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2012. – 384 с.
2. Bonnett A.H., Yung C. Increased efficiency versus increased reliability // IEEE Industry Applications Magazine. – 2008. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 29–36.
3. Афонин П.Т. Организация контроля качества в станкостроении. – М., 1968. – 144 с.
4. Жизневский В.А., Тюленев М.Е. Методика спектрографического анализа состояния асинхронного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – С. 94–99.
5. Бурцев А.Г., Дягилева Т.В., Пан А.Г. Спектральный анализ тока статора трехфазного асинхронного двигателя при аварийных режимах работы // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2–1. – 8 с.
6. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.
7. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев [и др.]; под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
8. Bonnett A.H. Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2000. – Vol. 36, № 5. – P. 1435–1448.
9. Frosini L., Bassi E. Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57, № 1. – P. 244–251.
10. Beltran-Carbajal F. Vibration Analysis and Control – New Trends and Developments. Chapter 13: Bearings Fault Detection Using Inference Tools // InTech. – 2011. – P. 264–280.
11. Induction motor mechanical fault identification using Park’s vector approach / S. Ben Salem, W. Touti, K. Bacha, A. Chaari // International Conference on Electrical Engineering and Software Applications (ICEESA). – 2013. – P. 1–6.
12. Estima, J.O., Freire N.M.A., Cardoso A.J.M. Recent advances in fault diagnosis by Park’s vector approach // IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD. – 2013. – P. 279–288.

13. Чабанов Е.А., Судаков А.И., Шулаков Н.В. Новые подходы к получению исходной информации и методам идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 8. – С. 114–127.

14. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шутемов С.В. Новые подходы к погрешностному анализу результатов исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 8. – С. 166–172.

15. Шумилов А.А., Тюленев М.Е. Анализ влияния межвитковых замыканий на спектрограмму потребляемых токов в асинхронных двигателях // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 4, № 1. – С. 105–108.

16. Петухов В.С. Способ диагностики электродвигателей переменного тока и связанных с ним механических устройств: пат. 2339049 Рос. Федерация; опубли. 02.03.2007.

17. Вейнреб К. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // Электричество. – 2012. – № 7. – С. 51–57.

18. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя // Metallургические процессы и оборудование. – 2013. – № 1(31). – С. 61–65.

19. Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде LabView. – СПб.: Санкт-Петербург. гос. ун-т информационных технологий, механики и оптики, 2015. – 82 с.

20. Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines / J. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. Roger Folch, P. Molina Palomares // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2006. – Vol. 42. – № 4. – P. 990–996.

21. Способ диагностики технического состояния электродвигателя по его электрическим параметрам: пат. Рос. Федерация № 2425391 / А.Е. Козярук, Ю.Л. Жуковский, М.С. Черемушкина, А.А. Коржев, А.В. Кривенко. 2009. Бюл. № 21.

## References

1. Nosov V.V. Diagnostika mashin i oborudovaniia [Diagnostics of machines and equipment: study]. 2nd ed. Saint Petersburg: Lan', 2012. 384 p.
2. Bonnett A.H., Yung C. Increased efficiency versus increased reliability. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2008, vol. 14, iss. 1, pp. 29-36.
3. Afonin P.T. Organizatsiia kontroliia kachestva v stankostroenii [Organization of quality control in the machine tool industry]. Moscow, 1968. 144 p.
4. Zhiznevskii V.A., Tiulenev M.E. Metodika spektrograficheskogo analiza sostoiianiia asinkhronnogo dvigatelya [Methods of spectrographic analysis of the state of an asynchronous engine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, pp. 94-99.
5. Burtsev A.G., Diagileva T.V., Pan A.G. Spektral'nyi analiz toka statora trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya pri avariinykh rezhimakh raboty [Spectral analysis of the stator current of a three-phase asynchronous motor during emergency operation]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2015, no. 2-1. 8 p.
6. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoiianiia elektrodvigatelyei. Metod spektral'nogo analiza potrebliaemogo toka [Diagnostics of the state of electric motors. The method of spectral analysis of current consumption]. *Novosti elektrotehniki*, 2005, no. 1(31), pp. 50-52.
7. Kliuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. et al. Nerazrushaiushchii kontrol' i diagnostika: spravochnik [Non-destructive testing and diagnostics: a reference book]. Ed. V.V. Kliuev. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 656 p.
8. Bonnett A.H. Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, vol. 36, no. 5, pp. 1435-1448.
9. Frosini L., Bassi E. Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 244-251.
10. Beltran-Carbajal F. Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments. Chapter 13: Bearings Fault Detection Using Inference Tools. *InTech*, 2011, pp. 264-280.
11. Induction motor mechanical fault identification using Park's vector approach / S. Ben Salem, W. Touti, K. Bacha, A. Chaari. *International Conference on Electrical Engineering and Software Applications (ICEESA)*, 2013, pp. 1-6.

12. Estima, J.O., Freire N.M.A., Cardoso A.J.M. Recent advances in fault diagnosis by Park's vector approach. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD*, 2013, pp. 279-288.

13. Chabanov E.A., Sudakov A.I., Shulakov N.V. Novye podkhody k polucheniiu iskhodnoi informatsii i metodam identifikatsii perekhodnykh protsessov moshchnykh sinkhronnykh mashin [New approaches to obtaining initial information and methods for identifying transient processes of powerful synchronous machines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, no. 8, pp. 114-127.

14. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Shutemov S.V. Novye podkhody k pogreshnostnomu analizu rezul'tatov issledovaniia i identifikatsii perekhodnykh protsessov moshchnykh sinkhronnykh mashin [New approaches to the error analysis of the results of research and identification of transients of powerful synchronous machines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, no. 8, pp. 166-172.

15. Shumilov A.A., Tiulenev M.E. Analiz vliianiia mezhvitkovykh zamykaniy na spektrogrammu potrebliaemykh tokov v asinkhronnykh dvigateliakh [Analysis of the influence of interturn closures on the spectrogram of consumed currents in asynchronous motors]. *Nauchnye issledovaniia i innovatsii*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 105-108.

16. Petukhov V.S. Sposob diagnostiki elektrodvigatelei peremennogo toka i sviazannykh s nim mekhanicheskikh ustroystv [Method for the diagnosis of AC motors and related mechanical devices]. Patent no. 2339049 Rossiiskaia Federatsiia (2007).

17. Veinreb K. Diagnostika neispravnostei rotora asinkhronnogo dvigatelia metodom spektral'nogo analiza tokov statora [Diagnostics of rotor failures of an induction motor using the method of spectral analysis of stator currents]. *Elektrichestvo*, 2012, no. 7, pp. 51-57.

18. Barkov A.V., Borisov A.A. Sovremennye vozmozhnosti diagnostirovaniia mashin s elektroprivodom po toku dvigatelia [Modern possibilities of diagnosing machines with electric motor current]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*, 2013, no. 1(31), pp. 61-65.

19. Vasil'ev A.S., Lashmanov O.Iu. Osnovy programmirovaniia v srede LabView [Basics of programming in the environment LabView]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2015. 82 p.

20. Antonino-Daviu J., Riera-Guasp M., Roger Folch J., Molina Palomares P. Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 990-996.

21. Koziaruk A.E., Zhukovskii Iu.L., Cheremushkina M.S., Korzhev A.A., Krivenko A.V. Sposob diagnostiki tekhnicheskogo sostoianiia elektrodvigatelia po ego elektricheskim parametram [Method for diagnosing the technical condition of an electric motor according to its electrical parameters]. Patent no. 2425391 Rossiiskaia Federatsiia (2009).

#### Сведения об авторах

**Токарев Роман Олегович** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ju11071996@yandex.ru).

**Шапошников Владислав Валерьевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladislav96gg@gmail.com)

**Чабанов Евгений Александрович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29); доцент кафедры «Технические дисциплины» Пермского филиала Волжского государственного университета водного транспорта (614060, Пермь, Бульвар Гагарина, 33, e-mail: ceapb@mail.ru).

**Чабанова Евгения Владимировна** (Пермь, Россия) – кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой «Гуманитарные дисциплины» Пермского филиала Волжского государственного университета водного транспорта (614060, Пермь, Бульвар Гагарина, 33, e-mail: jentosina@yandex.ru).

### **About the authors**

**Tokarev Roman Olegovich** (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky pr. 29, e-mail: ju11071996@yandex.ru).

**Shaposhnikov Vladislav Valeryevich** (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky pr. 29, e-mail: vladislav96gg@gmail.com).

**Chabanov Evgenii Aleksandrovich** (Perm, Russia) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky pr. 29), Associate Professor of Department of Technical Disciplines Volga State University of Water Transport (Perm branch) (614060, Perm, Gagarina bulvar, 33, e-mail: ceapb@mail.ru).

**Chabanova Evgeniya Vladimirovna** (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor Head of the Department of Humanities Perm branch of Volga State University of Water Transport (614060, Perm, Gagarina bulvar, 33, e-mail: jentosina@yandex.ru).

Получено 15.04.2019