

системах произвести учет неравномерности припуска и выбрать гарантированные зоны безопасных ускоренных перемещений, при этом общее время обработки заготовки сократилось на 74 часа (на 31 % от общего времени обработки на станке). Все это в совокупности позволяет говорить, что производительность обработки подобных заготовок на оборудовании с ЧПУ значительно возрастает при одновременном снижении риска поломки элементов системы станок – приспособление – инструмент – деталь.

#### Библиографические ссылки

1. Печёнкин И. А., Сивцев Н. С., Пузанов Ю. В., Бажин А. Г. Автоматизированная технология обработки деталей ружья МР-27ЕМ // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 3 (59). – С. 021–024.
2. Печёнкин И. А., Сивцев Н. С., Пузанов Ю. В., Бажин А. Г. Новая автоматизированная технология пригонки поверхностей // Инженерия поверхности и реновация изделий : матер. 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 03–07 мая 2013 г., г. Ялта – Киев. – С. 215–217.

3. Печёнкин И. А., Бажин А. Г., Пузанов Ю. В., Сивцев Н. С. Формирование геометрии поверхностей деталей, имеющих заведомо неизвестные точностные характеристики // Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Пенз. гос. технол. универ., 2013. – С. 150–154.

4. Bazhin A. G. Pechenkin I. A., Puzanov Yu. V., Bazhin A. G. Hardware and software complex development of processing of precisely conjugated parts based on the Delcam modules // Universology: definitions, issues and concepts [the electronic resource] : the electronic scientific publication: proceedings from the Teachers' Technical Scientific Conference (in the English language), Izhevsk, 27 June 2013 y. / Kalashnikov Izhevsk State Technical University. – Electronic data (1file : 3,18Mb). – Izhevsk, 2013. – 64pp. – 1 electronic disk (CD-ROM). – System requirements: Acrobat Reader 6.0 and on – ISBN 978-5-7526-0654-0.

5. Печёнкин И. А., Пузанов Ю. В., Бажин А. Г. Обработка результатов измерений при изготовлении сложно-пряженных деталей сборочной единицы // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 82–85.

6. Delcam. – URL: <http://www.delcam.ru/products/products.htm> (дата обращения: 26.10.2014).

\* \* \*

I. A. Pechenkin, Post-graduate, Izhevsk State Agricultural Academy  
V. Yu. Puzanov, PhD in Engineering, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
R. M. Gilfanov, Director of "Izh-Rest" Ltd.

#### Application of 3D laser scanning to increase the machining efficiency of operating surfaces for stamp tooling

*The paper grounds implementation of 3D laser scanning in the mechanical production process of stamp tooling parts increasing the performance characteristics of machining.*

**Keywords:** laser scanning, CNC, machining, 3D, stamp tooling.

Получено: 10.11.14

УДК 62-83(045)

П. И. Степанов, аспирант, старший преподаватель

С. В. Лагуткин, кандидат технических наук, доцент

Новоуральский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Ю. Р. Никитин, кандидат технических наук, доцент

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ\*

*Рассматриваются механические и электрические диагностические параметры электрического привода. Исследована связь между механическими, электрическими диагностическими параметрами и техническим состоянием электрического привода на примере стэнда, состоящего из асинхронного двигателя, муфты и червячного редуктора. Исследовалось изменение спектра виброскорости и коэффициентов вейвлет-анализа электрического тока статора привода в режиме холостого хода и под нагрузкой при отсутствии и наличии дефектов: расцентровка зубчатой передачи и дисбаланс ротора двигателя.*

**Ключевые слова:** диагностика, электрический привод, асинхронный двигатель, червячный редуктор, спектр вибрации, электрический ток, вейвлет-анализ.

#### Введение

С ростом автоматизации и современного производства повышаются требования к его надежности. Чтобы избежать аварийной остановки автоматизированного технологического оборудования, необходимо выполнять его диагностику и прогнозировать

аварии узлов, которые могут возникнуть при эксплуатации. Таким образом, диагностика оборудования становится наиболее перспективным и быстро развивающимся аспектом современного производства.

В работах [1–18] рассмотрены вопросы диагностики электрических двигателей и технологического оборудования. Одним из современных инструментов принятия решений в области технической диагностики являются методы искусственного интеллекта, рассмотренные в работах [19–24].

#### Экспериментальные исследования

Для исследования механических и электрических диагностических параметров электрических приводов проведен анализ наиболее часто возникающих дефектов электрических приводов. Выявлено, что часто встречаются следующие дефекты: расцентровка зубчатой передачи и дисбаланс ротора двигателя. Поэтому на испытательном стенде выполнялась эмуляция данных дефектов. Фотография стенда приведена на рис. 1.

Использовались вибропреобразователь AP2019 (установка на муфту, крепление на магнит) и датчики тока LEM LA-55P (установка на 3 фазы статора асинхронного двигателя).

Все эксперименты проводились в режиме холостого хода (без нагрузки) и с нагрузкой на выходном валу червячного редуктора ( $M = 32 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ).

Мощность электродвигателя  $P = 0,18 \text{ кВт}$ . Частота вращения  $n = 1350 \text{ об/мин}$ . Червячный редуктор МЧ-40М-31,5-47,6-51-5-1С-У3. Использовался осциллограф Tektronix TDS3014, и измеренные данные обрабатывались в программных продуктах MathCAD и MathLAB. Время  $dt$  и частотный диапазон спектра связан с особенностями проведения экспериментов.

На рис. 2 и 3 приведен спектр виброскорости полностью исправного электрического привода в режиме холостого хода и с нагрузкой соответственно. Под нагрузкой происходит общее увеличение средней амплитуды виброскорости с 2 до 10 мм/с и появление вибрации на оборотной частоте  $F_{r1} = 22,4 \text{ Гц}$  (амплитуда виброскорости 25 мм/с) и ее гармонике (амплитуда виброскорости 24 мм/с).

На рис. 4 и 5 приведены спектры виброскорости с расцентровкой червячной передачей и дисбалансом ротора двигателя соответственно.

При расцентровке зубчатой передачи происходит резкое увеличение амплитуды виброскорости на оборотной частоте  $F_{r1} = 22,4 \text{ Гц}$  (амплитуда виброскорости 80 мм/с) и ее гармониках (2, 3 и 4), на зубцовой частоте  $F_z = 90 \text{ Гц}$  (110 мм/с) и ее второй гармонике по сравнению с исправным электрическим приводом под нагрузкой примерно в 5 раз.

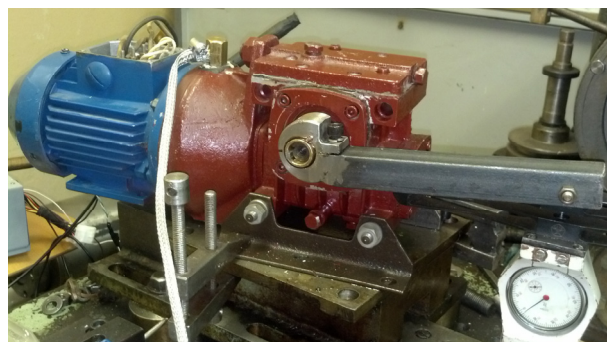


Рис. 1. Фотография испытательного стенда

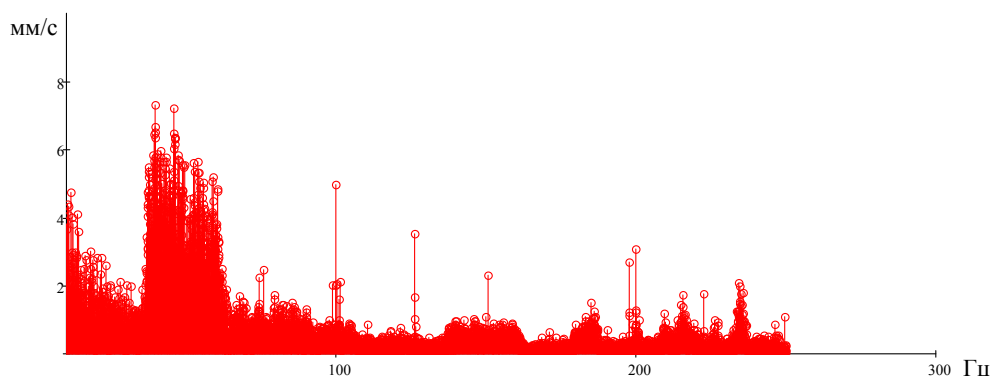


Рис. 2. Спектр виброскорости исправного электрического привода в режиме холостого хода ( $dt = 0,002 \text{ с}$ )

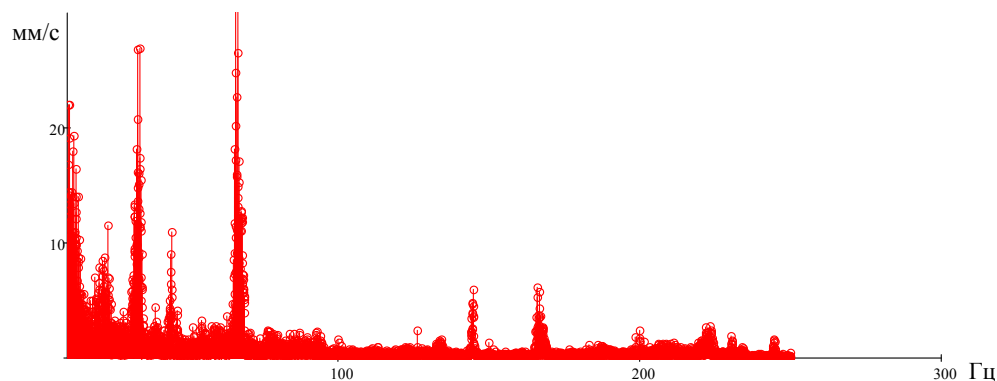


Рис. 3. Спектр виброскорости исправного электрического привода под нагрузкой ( $dt = 0,002 \text{ с}$ )

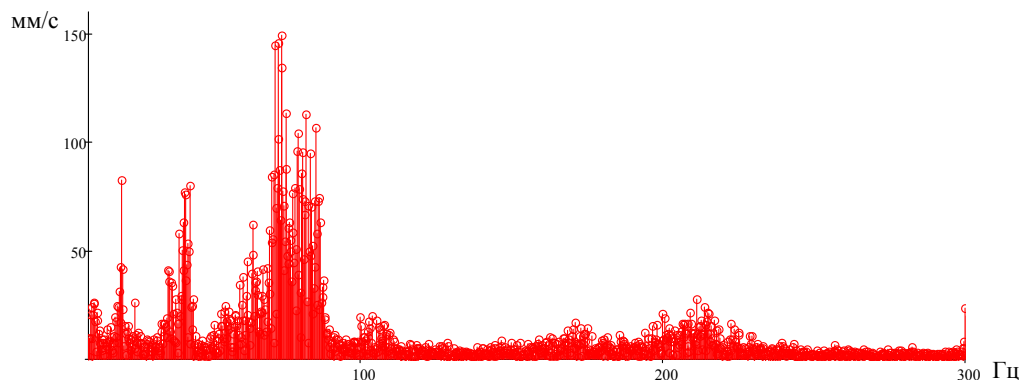


Рис. 4. Спектр виброскорости электрического привода с расцентровкой зубчатой передачи под нагрузкой ( $dt = 0,0004$  с)

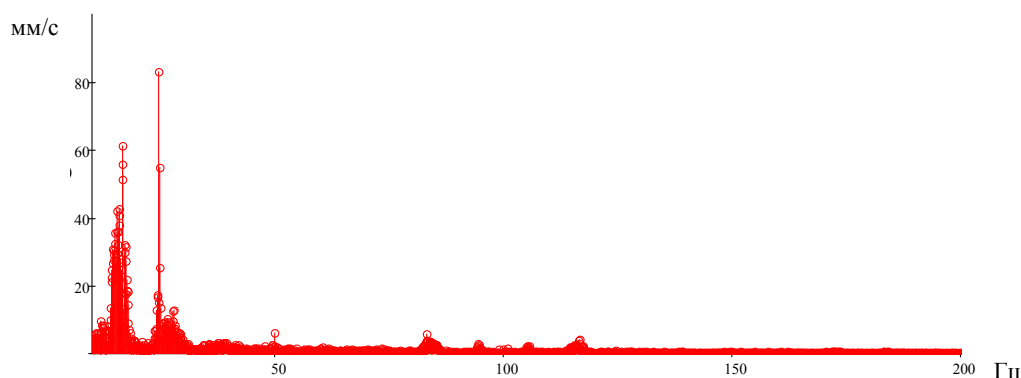


Рис. 5. Спектр виброскорости электрического привода с дисбалансом ротора в режиме холостого хода ( $dt = 0,001$  с)

При возникновении дисбаланса происходит увеличение амплитуды на оборотной частоте  $F_{r1} = 22,4$  Гц (амплитуда виброскорости 82 мм/с) и ее гармониках (2, 3 и 4), появляется «энергетический горб» на низких частотах (до 15 Гц). Амплитуда виброскорости по сравнению с исправным электрическим приводом (в режиме холостого хода) увеличилась примерно в 5–8 раз.

Проведен вейвлет-анализ электрического тока трех фаз статора двигателя. Использовались вейвлеты Добеши ( $db-8$ ). На рис. 6–9 приведены данные, полученные при тех же условиях эксперимента.

Приведены коэффициенты, которые значительно изменились при наличии дефектов электрического привода.

На рис. 7 видно изменение амплитуды коэффициентов  $d4$ : с 0,02 до 1,  $d3$ : с 1 до 0,5,  $d2$ : с 0,5 до 0,1,  $d1$ : с 0,1 до 0,2 по сравнению с исправным электрическим приводом в режиме холостого хода (рис. 6).

На рис. 9 видно изменение амплитуды коэффициентов  $d7$ : с 0,01 до 0,03,  $d6$ : с 0,02 до 0,04,  $d5$ : с 0,02 до 2,  $d4$ : с 0,03 до 0,2 по сравнению с исправным электрическим приводом под нагрузкой (рис. 8).

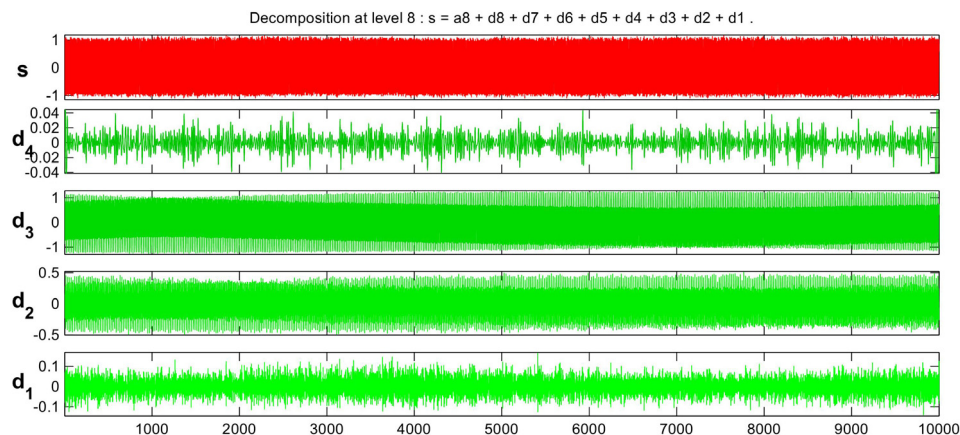


Рис. 6. Электрический ток второй фазы статора исправного привода и его вейвлет-преобразование в режиме холостого хода ( $dt = 0,002$  с)

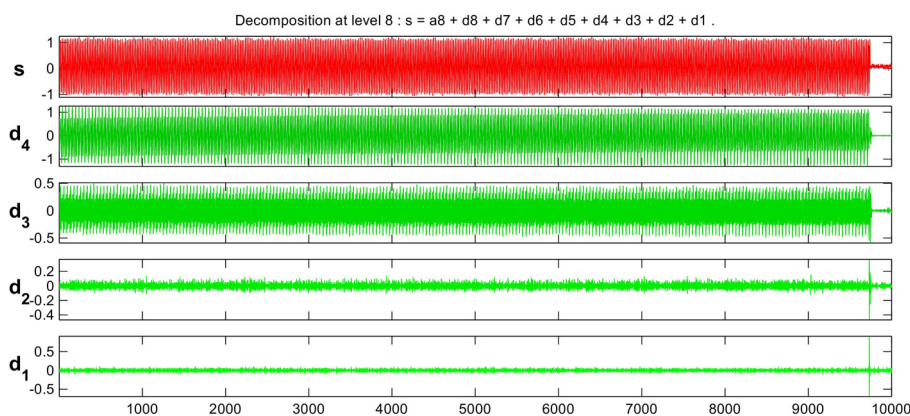


Рис. 7. Электрический ток второй фазы статора привода и его вейвлет-преобразование при дисбалансе ротора в режиме холостого хода ( $dt = 0,001$  с)

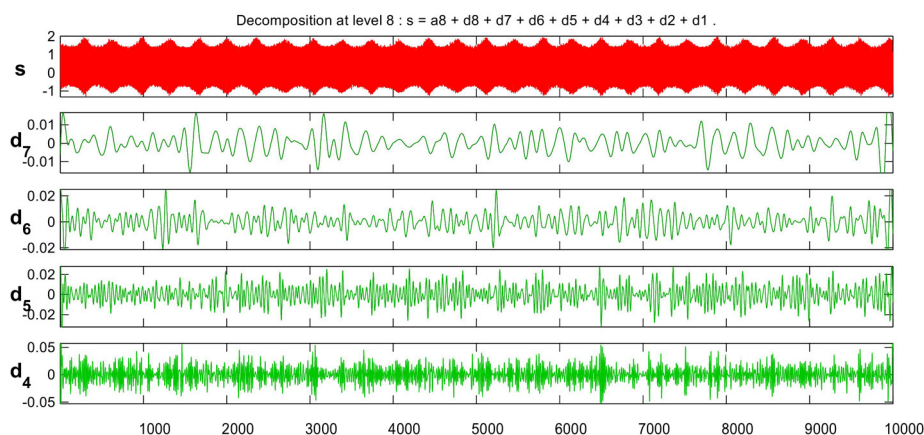


Рис. 8. Электрический ток третьей фазы статора исправного привода и его вейвлет-преобразование под нагрузкой ( $dt = 0,002$  с)

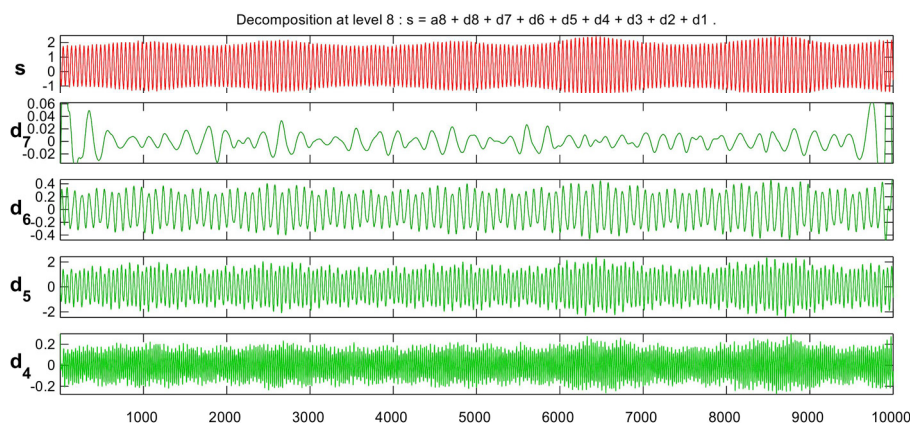


Рис. 9. Электрический ток третьей фазы статора привода и его вейвлет-преобразование при расцентровке зубчатой передачи под нагрузкой ( $dt = 0,0004$  с)

Анализ полученных результатов показал увеличение значений определенных коэффициентов при возникновении дефектов электрического привода. Каждый коэффициент соответствует своей полосе частот спектра электрического тока. Следовательно, можно исследовать изменения коэффициентов и использовать данную зависимость для создания базы данных дефектов.

### Заключение

В данной работе были выявлены механические и электрические диагностические параметры для определения технического состояния электрического привода. Выявлены изменения спектра виброскорости и коэффициентов вейвлет-преобразования электрического тока статора привода при отсутствии и наличии дефектов: расцентровка зубчатой передачи и дисбаланс ротора двигателя.

По результатам данного исследования разрабатывается интеллектуальная система принятия решения, основанная на нечеткой логике.

#### Библиографические ссылки

1. Abramov I. V., Abramov A. I., Nikitin Yu. R., Sosnovitch E. V. Brushless DC motor diagnostic model // Technological Forum 2014: 5 International technical conference // Book of proceeding (Kouty, Czech Republic, 17-19.06.2014). – Prague: Czech technical university in Prague. P. 173–177.
2. Bulatova A. V., Nikitin Yu. R. Complex approach to electric drives diagnostics // Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum “Education Quality – 2014” Conference proceedings (April, 23, 2014, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. P. 289–292.
3. Cowan R. S., Winer W. O. Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems // Machinery Diagnostics. Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 387–410.
4. Dovban’ S. N., Veselov O. V. Technical diagnostics of electromechanical systems based on the analysis of distorted output signal // Automation and Remote Control. November 2012, Vol. 73, Issue 11. P. 1902–1909.
5. Hammer M., Šimková M., Ministr M. Artificial Intelligence in Diagnostics of Electric Machines // Recent Advances in Mechatronics. 2010. P. 139–144.
6. Lee Y. S., Kim Y. W. Condition monitoring of induction motors for vertical pumps with the current and vibration signature analysis // Experimental analysis of nano and engineering materials and structures. Springer, Dordrecht, 2007. P. 419–420.
7. Nikitin Y., Abramov I. Mechatronic modules diagnosis by use of fuzzy sets // Proceedings of 14-th International Conference on Mechatronics. – 1–3 June, 2011. – Trencinske Teplice, Slovakia. P. 109–111.
8. Nikitin Y. R., Abramov I. V. CNC machines diagnostics // Proceedings 13-th International Symposium on Mechatronics. – 2–4 June, 2010. – Trencinske Teplice, Slovakia. P. 89–91.
9. Saitaev D. V., Nikitin Yu. R. Development of the device diagnostics of electric drives // Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum “Education Quality – 2014” Conference proceedings (April, 23, 2014, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. P. 389–392.
10. Stepanov P., Nikitin Yu. Diagnostics of Mechatronic Systems on the Basis of Neural Networks with High-Performance Data Collection // Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances. Brno, Czech Republic, Springer International Publishing Switzerland, 2014. P. 433–440.
11. Stolbov K. L., Nikitin Yu. R. Model of diagnosing the engines of motor-gearboxes of the roll train 250 // Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of

International Forum “Education Quality – 2014” Conference proceedings (April, 23, 2014, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. P. 336–339.

12. Муравьев В. В. Перспективные методы и средства технической диагностики и неразрушающего контроля материалов и изделий // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 1. – С. 20–33.
13. Никитин Ю. Р., Абрамов И. В. Диагностирование мехатронных систем : учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. – 116 с.
14. Никитин Ю. Р., Абрамов И. В. О построении системы диагностирования станков с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 4. – С. 32–35.
15. Никитин Ю. Р., Абрамов И. В., Степанов П. И. Логико-лингвистическая модель диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса мехатронных объектов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. С. 79–87.
16. Санников А. А., Кузубина Н. В. Техническая диагностика машин и оборудования // Подготовка кадров и эффективность производства. Предприятие – вуз. Опыт многолетнего сотрудничества : монография. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2013. С. 263–280.
17. Смирнов А. Н., Герике Б. Л., Муравьев В. В. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов. – Новосибирск : Наука, 2003. – 244 с.
18. Степанов П. И., Лагуткин С. В., Никитин Ю. Р. Комплексная токовая и вибродиагностика электромеханических систем // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 160–165.
19. Bulatova A. V., Nikitin Yu. R. Complex approach to electric drives diagnostics // Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum “Education Quality – 2014” Conference proceedings (April, 23, 2014, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. P. 289–292.
20. Hammer M., Šimková M., Ministr M. Artificial Intelligence in Diagnostics of Electric Machines // Recent Advances in Mechatronics. 2010. P. 139–144.
21. Nikitin Y., Abramov I. Mechatronic modules diagnosis by use of fuzzy sets // Proceedings of 14-th International Conference on Mechatronics. – 1–3 June, 2011. – Trencinske Teplice, Slovakia. P. 109–111.
22. Stepanov P., Nikitin Yu. Diagnostics of Mechatronic Systems on the Basis of Neural Networks with High-Performance Data Collection // Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances. Brno, Czech Republic, Springer International Publishing Switzerland, 2014. P. 433–440.
23. Никитин Ю. Р., Абрамов И. В. Диагностирование мехатронных систем : учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. – 116 с.
24. Никитин Ю. Р., Абрамов И. В., Степанов П. И. Логико-лингвистическая модель диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса мехатронных объектов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. С. 79–87.

\*\*\*

P. I. Stepanov, Post-graduate, Senior Lecturer, Novouralsky Technological Institute (branch of) National Research Nuclear University “MEPhI”  
S. V. Lagutkin, PhD in Engineering, Associate Professor, Novouralsky Technological Institute (branch of) National Research Nuclear University “MEPhI”  
Yu. R. Nikitin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Mechanical and Electric Diagnostic Parameters of Electric Drives

The paper considers the mechanical and electrical diagnostic parameters of the electric drive. The relationship is investigated between mechanical, electrical diagnostic parameters and the technical condition of the electric drive as an example of the stand, which consists of an induction motor, coupling and worm gear. We study the change in the vibration spectrum and the Wavelet analysis coefficients of the electric current drive stator at idle and under load, in the absence and presence of defects: misalignment and imbalance gear motor.

**Keywords:** diagnostics, electric drive, induction motor, worm gear, vibration spectrum, electric current, Wavelet analysis