



АВТОНОМНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Пырко С.А.¹, Митиогло А.М.², Ишметьев Е.Н.³

¹ ООО «Бюро Системного Программирования», Москва, Россия

² ПАО МАК «Вымпел», Москва, Россия

³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В статье дается краткий анализ проблемы диагностики текущего состояния асинхронных двигателей переменного тока с перечислением основных используемых в настоящее время методов диагностики, включая сигнатурный анализ тока статора, анализ внешнего магнитного поля двигателя, вибродиагностику и мониторинг температуры наиболее ответственных узлов. Отмечено, что в настоящее время в промышленности происходит постепенный переход от концепции «планового обслуживания» технологического оборудования к более эффективной концепции «обслуживания по состоянию». Последняя, относящаяся к базовым технологиям промышленного Интернета вещей (IIoT), предполагает сбор данных о состоянии большого числа электродвигателей, находящихся в эксплуатации, посредством специализированных автономных измерительных модулей (смарт-сенсоров). Указаны базовые требования, предъявляемые к автономным измерительным модулям систем IIoT. Приведена таблица характеристик указанных модулей ведущих мировых производителей. Перечислены и кратко охарактеризованы исследования, выполненные специализированной группой разработчиков в области автономных измерительных модулей, включая моделирование различных неисправностей двигателя, разработку стендового оборудования для имитации неисправностей, исследование различных вариантов крепления модуля к электродвигателю а также исследования, проводимые с целью обеспечения требуемой продолжительности работы модуля в автономном режиме. Описаны основные этапы создания модуля, предназначенного для преобразования в электрические сигналы физических величин, характеризующих состояние контролируемой электрической машины, преобразования указанных сигналов в цифровую форму, накопления и анализа полученных данных с передачей их посредством беспроводного канала связи на специализированный сервер обработки данных. Приведены характеристики разработанного модуля, полученные в результате испытаний.

Ключевые слова: электродвигатель, диагностика, измерительный модуль.

© Пырко С.А., Митиогло А.М., Ишметьев Е.Н., 2020

Для цитирования

Пырко С.А., Митиогло А.М., Ишметьев Е.Н. Автономные измерительные модули для систем диагностики электродвигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 80–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-80-89>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

AUTONOMOUS MEASURING MODULES FOR ELECTRIC MOTOR DIAGNOSTIC SYSTEMS

Sergyey A. Pyrko¹, Alexey M. Mitioglo², Evgeniy N. Ishmetyev³

¹ LLC Bureau of System Programming, Moscow, Russia

² PJSC Interstate Joint Stock Corporation Vympel, Moscow, Russia

³ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The paper provides a brief analysis of the problem of diagnosing a current state of asynchronous AC motors with a list of main currently used diagnostic methods, including stator current signature analysis, external magnetic field analysis, vibration diagnostics and temperature monitoring of the most critical units. It is noted that now in industry there is a gradual transition from the concept of “planned maintenance” of technological equipment to a more efficient concept of condition-based maintenance. The latter, related to the basic technologies of the industrial Internet of things (*IIoT*), involves acquisition of data on the state of a large number of electric motors in operation, using specialized autonomous measuring modules (Smart Sensors). The basic requirements for autonomous measuring modules of *IIoT* systems are indicated. The paper contains the table of characteristics of the indicated modules by leading world manufacturers. It lists and briefly characterizes the studies carried out by a specialized team of developers in the field of smart sensors, including the modeling of various motor malfunctions, the development of bench equipment for simulating malfunctions, the study of various options for attaching the module to an electric motor, and the studies carried out to ensure the required battery life of the module offline. The authors described the main stages of creating a module intended for converting physical quantities, characterizing the state of a controlled electric machine, into electrical signals, converting these signals into a digital form, accumulating and analyzing the received data by transmitting them via a wireless communication channel to a specialized data processing server. The characteristics of the developed module obtained as a result of testing are given.

Keywords: electric motor, diagnostics, measuring module.

For citation

Pyrko S.A., Mitioglo A.M., Ishmetyev E.N. Autonomous Measuring Modules for Electric Motor Diagnostic Systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 80–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-80-89>

Введение

В настоящее время трехфазный двигатель переменного тока является высокоэффективным преобразователем электрической энергии в механическую. Эти двигатели надежны – их конструкция проста и отработана за более чем сто лет серийного производства. Вместе с тем в силу различных причин выход из строя электродвигателя, находящегося в условиях интенсивной эксплуатации, не является исключительным событием. При этом отметим, неисправности статора, ротора и подшипников являются причиной отказа электродвигателей в 88% случаев [1].

Для диагностики состояния электродвигателей разработаны и используются на практике следующие основные методы:

- **Сигнатурный анализ тока статора**, в основе которого лежит анализ спектральных компонент тока (например, [2]). Данный метод является оптимальным для диагностики электродвигателей, работающих в установившемся режиме, т.е. с малоизменяющейся частотой и нагрузкой [3].

- **Анализ внешнего магнитного поля двигателя** – его аксиальной и радиальной компонент [4]. Основным преимуществом метода является простота реализации, недостатком – сложность моделирования электромагнитных процессов и необходимость учета экранирующего эффекта корпуса двигателя [5].

- **Вибродиагностика**, при которой производится анализ параметров механической вибрации (перемещение, скорость, ускорение) элементов контролируемого двигателя в процессе его функционирования. В вибродиагностике используются различные подходы – как рассмотрение отдельных спектральных компонент параметров вибрации [6], так и анализ их среднеквадратических значений, измеренных в установленном частотном диапазоне.

- **Мониторинг температуры наиболее ответственных узлов.**

Существует также другие методы и подходы (например, [7]), в силу ряда причин (неизученность, сложность реализации и т. д.) используемые реже.

Указанные основные и дополнительные методы обладают неодинаковой эффективностью при диагностике различных неисправностей двигателей. Так, установлено [8], что сигнатурный анализ токов статора наиболее чувствителен по отношению к выявлению неисправных (сломаных) стержней ротора, вибродиагностика – к выявлению неисправностей подшипников. Также в некоторых случаях при диагностике состояния подшипников оптимальным может оказаться (из-за присущей методу высокой помехоустойчивости) анализ спектральных компонент звука (т. е. акустического сигнала), создаваемого вращающимся валом двигателя.

Современное состояние проблемы. Автономные измерительные модули

В настоящее время в промышленности происходит постепенный переход от концепции «планового обслуживания» технологического оборудования к значительно более эффективной концепции «обслуживания по состоянию». Последняя предполагает передачу больших объемов данных от датчиков, установленных непосредственно на оборудовании, их (данных) автоматический анализ и выработку соответствующих решений и прогнозов относительно текущего и будущего состояния контролируемых объектов.

Обслуживание по состоянию и прогнозное обслуживание (в рассматриваемом случае – двигателей) на современном этапе развития техники относятся к базовым технологиям «промышленного Интернета вещей» (*IIoT*).

В свою очередь, датчики систем *IIoT* (*Smart Sensors*) [9], обеспечивающие измерение параметров технологического объекта, характеризующих его состояние, должны обладать рядом функций и свойств, основными из которых являются:

- **Беспроводная передача данных на сервер** – из-за невозможности или (наиболее часто) экономической нецелесообразности прокладки проводных линий связи в местах установки модулей.

- **Предварительная обработка данных** непосредственно в модуле – для снижения вычислительной нагрузки на устройства централизованной обработки данных.

- **Минимальное энергопотребление** – для обеспечения длительной работы в автономном по питанию режиме.

- **Устойчивость по отношению к различным возмущающим факторам** (механическим, электромагнитным и т. д.) в месте установки модулей. Очевидно, это налагает определенные требования к конструктивному исполнению модулей.

Надежность. Способность работать длительное время без какого-либо обслуживания. Самодиагностика и самокалибровка.

- **Минимально возможная цена одного модуля.** Очень часто данные устройства являются многофункциональными [10], то есть совмещающими функции, например, измерения вибрации [11, 12], температуры и т. д., – это уменьшает количество модулей в системе и цену системы в целом.

В настоящее время ряд компаний, в том числе ведущие «игроки» на рынке средств автоматизации, представили целый ряд автономных измерительных модулей для систем контроля состояния двигателей (табл. 1).

Этапы разработки изделия 1–02. Исследования, выполненные в ходе разработки

Специализированная группа разработчиков выполняет разработку измерительных модулей для систем диагностики электродвигателей с августа 2017 г. Первоначально работы по данной тематике проводились в инициативном порядке и включали, в основном, исследования по следующим направлениям:

- Моделирование различных неисправностей двигателя для изучения их влияния на спектр его (двигателя) внешнего магнитного поля, включая:
 - неисправности статора: обрыв фазы, межвитковое замыкание;
 - неисправности ротора: эксцентриситет, обрыв и трещины стержней, обрыв или ослабление крепления «беличьей клетки».

Моделирование производилось посредством специализированного программного пакета *ANSYS Maxwell*. Верификация результатов моделирования производилась экспериментальным путем – на двигателях, имеющих соответствующие неисправности.

- Разработка и изготовление специализированного стендового оборудования для имитации различных электрических и механических неисправностей двигателей, включая неисправности подшипников, а также для отработки элементов разрабатываемого модуля. Один из разработанных стендов показан на рис. 1.

Таблица 1. Характеристики автономных измерительных модулей

Table 1. Characteristics of autonomous measuring modules

| Измерительный модуль | <i>ABB Ability™ Smart Sensor</i> | <i>WEG Motor Scan</i> | <i>Augury Endpoint 3XS</i> | <i>Endiio Retrofit Box</i> | <i>TestMotors SMS</i> |
|---|--|--|--|--|--|
| Источник информации | [13] | [14] | [15] | [16] | [17] |
| Измеряемые параметры работы электромотора | Вибрация Температура Напряжен. магн. поля Акустич. шум Время | Вибрация Температура Время | Вибрация Температура Напряжен. магн. поля Время | Вибрация Температура Напряжен. магн. поля Время | Вибрация Температура Время |
| Определяемые дополнительно параметры работы электромотора | Мощность Число оборотов Частота питающей сети Момент нагрузки Скольжение Число пусков за период | Мощность Число оборотов Частота питающей сети Нагрузка, % | н/д | н/д | Мощность Число оборотов Частота питающей сети Момент нагрузки Нагрузка в % Число пусков за период |
| Определяемые параметры состояния мотора | Общее состояние мотора Уровень вибрации Неиспр. подшипников Эксцентриситет Небаланс ротора Изгиб вала Неиспр. обмоток ротора | Неиспр. подшипников Эксцентриситет Небаланс ротора | н/д | н/д | Неиспр. системы питания, перегрузка Неиспр. обмотки статора Неиспр. ротора Небаланс, несоосность Эксцентриситет Неиспр. подшипников Неиспр. вентиляторов |
| Измерение вибрации | | | | | |
| Измеряемый параметр | скорость | ускорение | ускорение | ускорение | ускорение |
| Число осей | 3 | 3 | 3 | н/д | 2 |
| Диапазон измерения | 0,04–700 мм/с | ±16g | ±50g | ±16g | ±40g |
| Частотный диапазон | 10–1000 Гц | н/д | 11 кГц | 4 кГц (частота дискр.) | 1–6000 Гц |
| Вид сигнала | СКЗ | СКЗ | н/д | СКЗ | БПФ, СКЗ |
| Измерение температуры | | | | | |
| Диапазон измерения | от –40 до +85 °С | от –40 до +135 °С | от –40 до +135 °С | от –40 до +85 °С | от –40 до +150 °С |
| Погрешность измерения | не более ±0,5 °С | н/д | не более ±1,0 °С | не более ±1,0 °С | не более ±0,5 °С |
| Напряженность магнитного поля | | | | | |
| Диапазон измерения | н/д | – | ±600 Гаусс | ±4,8 мкТл | – |
| Погрешность измерения | н/д | – | н/д | не более ±0,6 мкТл | – |
| Частотный диапазон | н/д | – | 10 кГц | н/д | – |

| Беспроводная связь | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--|---|-------------------------|
| Протокол передачи данных | <i>Bluetooth® 4.0</i> | <i>Bluetooth® 4.1</i> | <i>Bluetooth</i> | <i>Endiio ultralow power</i> (проприетарный) | <i>Wi-Fi b/g/n</i> |
| Диапазон частот | 2,4 ГГц | 2,4 ГГц | 2,4 ГГц | 868, 915 Мгц | 2,4 ГГц |
| Тип антенны | встроенная | встроенная | встроенная | встроенная | встроенная |
| Электропитание | | | | | |
| Тип источника | элемент на основе перманганата лития | элемент на основе тионилхлорида | элемент на основе литиум-тионилхлорида | литий-железо-фосфатный аккумулятор | 4 литиевых элемента ААА |
| Автономность по питанию | не менее 5 лет | не менее 3 лет | не менее 3 лет | – | не менее 1 года |
| Конструктивное исполнение | | | | | |
| Степень защиты | <i>IP66</i> | <i>IP66</i> | <i>IP67</i> | <i>IP41 (IP65 опц.)</i> | <i>IP66</i> |
| Габаритные размеры корпуса | 130x76,7x16 мм | 25x44x38 мм | 49x49x85 мм | 50x40x35 мм | 143x65x38 мм |
| Масса | 254 г | 60 г | 185 г | 290 г | 500 г |

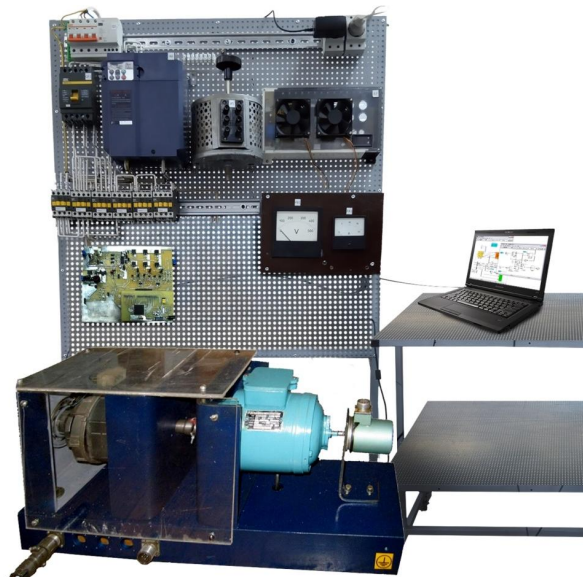


Рис. 1. Стенд для отработки изделия 1–02

Fig. 1. A test bed for item 1–02

- Разработка различных вариантов системы крепления модуля к контролируемому двигателю с целью минимизации искажений, вносимых указанной системой в процесс измерений.

- Исследования, проводимые с целью обеспечения требуемой продолжительности работы модуля в автономном режиме, в частности:

- оптимизация схемотехнических решений и алгоритмов цифровой обработки, процедур обмена данными по радиоканалу – для уменьшения энергопотребления;

- отработка вариантов получения энергии для питания модуля от дополнительных источников, включая различные типы аккумуляторов и батарей, вибропреобразователи и генераторы, приводимые потоком воздуха от вентилятора контролируемого двигателя.

Одновременно с проведением исследований был выполнен значительный объем работ по определению перспективности данной тематики для разрабатывающей группы и поиску перспективных заказчиков, были подготовлены рекламные материалы и выставочные образцы.

На основе действующих нормативных документов были сформированы технические требования к разрабатываемому модулю и системе в целом. Впоследствии, после начала сотрудничества с ПАО «ММК», было сформировано детальное ТЗ на систему и произведена корректировка перечня и содержания выполняемых работ.

Были разработаны и изготовлены макеты модуля, на которых обрабатывались съем измерительных сигналов с работающего двигателя и передача данных по беспроводному каналу – от места установки модуля до сервера. В последнем случае проводились сравнительные испытания эффективности различных протоколов передачи

данных в условиях интенсивных промышленных помех. В ходе испытаний макетов и непосредственно после их завершения были скорректированы и дополнены техническая концепция системы и алгоритмы, используемые для выявления неисправностей. В схемотехнику и конструктив модуля были внесены существенные изменения.

Далее была разработана конструкторская документация для опытных образцов изделия и изготовлены сами образцы.

Предсерийная партия модулей, выпущенная по рабочей документации, проходила испытания в две стадии – в условиях предприятия-изготовителя и у Заказчика в ПАО «ММК». Испытания прошли в целом успешно. В ходе их проведения было установлено полное соответствие испытываемых образцов требованиям ТЗ и пригодность изделия к длительной автономной эксплуатации в условиях металлургического производства.

Техническое описание изделия 1–02

Структурная схема изделия 1–02 приведена на **рис. 2**.

Изделие 1–02 функционирует следующим образом.

Модуль устанавливается непосредственно на корпусе контролируемой электрической машины с помощью специальной системы креплений. Датчики вибрации, температуры и электромагнитного поля смонтированы в оболочке специальной конструкции («капсулы»), частично выведенной за пределы корпуса модуля для обеспечения наиболее плотного прилегания ее контактной поверхности к контролируемой электрической машине.

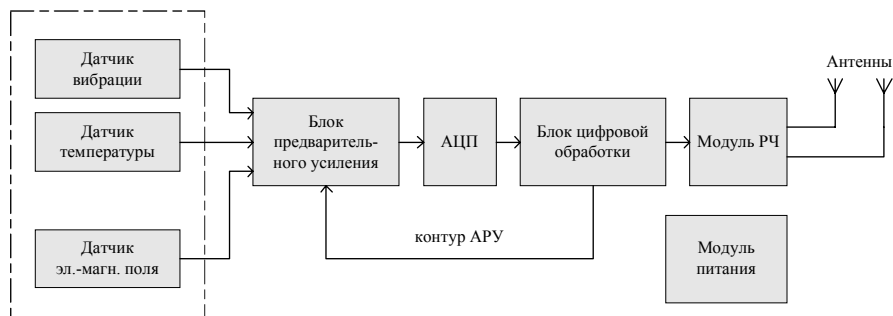


Рис. 2. Структурная схема изделия 1–02

Fig. 2. A block diagram of item 1–02

Сигналы от датчиков поступают в блок предварительного усиления, где производится их усиление и аналоговая фильтрация, и далее – в АЦП. В последнем аналоговые сигналы преобразуются в цифровую форму. Соответствие динамических диапазонов аналоговых сигналов датчиков и входа АЦП обеспечивается посредством системы автоматической регулировки усиления (АРУ).

В блоке цифровой обработки осуществляются необходимые преобразования сигналов, а также накопление полученных данных с их анализом и выработкой диагностических решений о текущем состоянии контролируемых электрических машин. Также в данном блоке вырабатывается сигнал управления для системы АРУ.

Через модуль РЧ и канал беспроводной (на радиочастоте) связи данные передаются на спе-

циализированный сервер обработки данных. В радиоканале используются протоколы передачи данных *Sub 1 GHz* и *Bluetooth*.

Сервер обработки данных производит систематизацию данных с выработкой заключений предсказательного характера об изменении контролируемых параметров с течением времени, а также визуализацию результатов работы программно-технического комплекса в целом.

Разработан также упрощенный вариант изделия 1–02, передающий «сырые» (необработанные) данные на Сервер; при этом анализ текущего состояния контролируемых электрических машин производится посредством ПО, установленного на Сервере.

Разработанный модуль (в базовом варианте) обладает следующими техническими параметрами (**табл. 2**):

Таблица 2. Параметры изделия 1–02

Table 2. Parameters of item 1–02

| Измеряемые параметры | вибрация температура напряженность магнитного поля время |
|---|--|
| Измерение вибрации: | |
| число осей | 3 |
| диапазон измерения | не менее $\pm 2g$ |
| нелинейность | не более $\pm 0,2\%$ от полной шкалы |
| температурный коэффициент чувствительности | не более $0,01\%/^{\circ}C$ |
| температурный коэффициент сдвига | не более $1\text{ м}g/^{\circ}C$ |
| частотный диапазон | от 0,5 до 1600 Гц |
| спектральная плотность шума, приведенная ко входу | не более $250\text{ }\mu\text{g}/\text{Гц}^{0,5}$ |
| Измерение температуры: | |
| диапазон измерения | от -55 до $+125\text{ }^{\circ}C^1$ |
| погрешность измерения | не более $\pm 0,5\text{ }^{\circ}C$ |
| Измерение напряженности магнитного поля: | |
| диапазон измерения | 8 мТл |
| частотный диапазон | 20 кГц |
| нелинейность | не более 1 % |
| пиковое значение шума, приведенное ко входу | не более 0,8 мТл |
| Параметры радиоканала: | |
| скорость обмена по интерфейсу <i>Sub 1 GHz</i> | не менее 25 кбит/с |
| скорость обмена по интерфейсу <i>BLE</i> | не менее 650 кбит/с |
| тип антенны | встроенная |
| Время автономной работы | не менее 5 лет ² |
| Рабочий температурный диапазон | от -30 до $+85\text{ }^{\circ}C$ |
| Температура хранения | от 10 до $+25\text{ }^{\circ}C$ |
| Элемент питания | LS14500CNA (A316/LR06/AA), 4 шт. |
| Крепление | винтом 1/4" 28UNF непосредственно на корпус или через монтажный клин |
| Конструктивное исполнение: | |
| степень защиты | IP67 |
| габаритные размеры корпуса | 138x88x25,5 мм |
| масса | 265 г |

¹ Ограничен рабочим температурным диапазоном изделия.

² В режиме измерения и обработки данных с интервалом 4 ч.

Неисправности электродвигателей, диагностируемые системой, в состав которой входит изделие 1–02 (табл. 3):

Таблица 3. Параметры, диагностируемые системой

Table 3. Parameters diagnosed by the system

| Диагностируемые неисправности АД: |
|---|
| асимметрия ротора |
| небаланс ротора |
| эксцентриситет воздушного зазора: |
| искривление ротора |
| неисправность ротора: |
| трещины стержней ротора |
| обрыв стержней ротора |
| неисправность статора: |
| межвитковые замыкания |
| повреждение изоляции |
| обрыв фазы |
| неисправности «беличьей клетки»: |
| обрыв или ослабление крепления стержней беличьей клетки |
| неисправности тел качения шарикоподшипников: |
| дефекты внешней дорожки ¹ |
| дефекты внутренней дорожки ¹ |
| ослабление крепления мотора к фундаменту |
| несоосность валов |
| Расчётные характеристики работы АД: |
| СКЗ виброскорости по оси X |
| СКЗ виброскорости по оси Y |
| СКЗ виброскорости по оси Z |
| СКЗ результирующего вектора виброскорости |
| температура корпуса |
| скольжение |
| обороты двигателя |
| частота питания |
| потребляемый ток |
| момент на валу двигателя |
| затянутый пуск двигателя |
| ¹ при установленных датчиках вибрации непосредственно на подшипниках |

Внешний вид изделия 1–02 приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид изделия 1–02

Fig. 2. External view of item 1–02

Выводы

Как итог, можно констатировать, что основным результатом усилий инициативной группы разработчиков в рассматриваемой области явилось создание научно-технического направления, включающего полный цикл исследований, разработки и производства специализированных автономных измерительных модулей для диагностики состояния трехфазных двигателей переменного тока.

Испытания опытных образцов и эксплуатация опытной партии модулей в условиях крупного металлургического предприятия выявили полноту и оптимальность используемых при разработке концепций, алгоритмических и схемотехнических решений. Сравнительные испытания разработанных модулей с изделиями аналогичного назначения подтверждают полное соответствие данной отечественной разработки уровню ведущих мировых компаний-производителей.

Разворачиваемое в настоящий момент широкомасштабное серийное производство разработанных модулей позволит полностью обеспечить потребности российских предприятий оборудованием данного назначения, сделав тем самым еще один шаг к повышению их технологической и экономической эффективности.

Список литературы

1. Thomson W.T, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Applications Magazine. 2001, vol. 7, no. 4, pp. 26–34. DOI: 10.1109/2943.930988.
2. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 3(57). С. 34–39.
3. Henaou N, Capolino G.-A., Fernandez-Cabanias M., Filippetti F., Bruzzone C., Strangas E., Pusca R., Estima J., Riera-Guasp M., Hedayati-Kia Sh. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines. A review of diagnostic techniques. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 31–42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651.

4. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя / В.Е. Вавилов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 1(71). С. 122–127.
5. Henaio H, Demian C., Capolino G.-A. A frequency-domain detection of stator-winding faults in induction machines using an external flux sensor. IEEE Transactions on Industry Applications. 2003, vol. 39, no. 5, pp. 1272–1279. DOI: 10.1109/TIA.2003.816531.
6. Intesar Ahmed, Manzar Ahmed, Kashif Imran, Muhammad Shuja Khan. Detection of Eccentricity Faults in Machine Using Frequency Spectrum Technique. Int. J. of Computer and Electrical Engineering. 2011, vol. 3, no. 1, pp. 111–119. DOI: 10.7763/IJCEE.2011.V3.300.
7. Ewert P. Application of Neural Networks and Axial Flux for the Detection of Stator and Rotor Faults of an Induction Motor. Power Electronics and Drives. 2019, vol. 4(39), pp. 201–213. DOI: 10.2478/pead-2019-0001.
8. Weidong Li, Mechefske Ch.K. Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods. J. of Vibration and Control. 2006, vol. 12, no. 2, pp. 165–188. DOI: 10.1177/1077546306062097.
9. Murphy, Ch. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application. Part 2. Analog Dialogue. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 28–33.
10. Medina-García J., Sánchez-Rodríguez T., Gómez Galán J.A., Delgado A., Gómez-Bravo F., Jiménez R. A Wireless Sensor System for Real-Time Monitoring and Fault Detection of Motor Arrays. Sensors. 2017, vol. 17, no. 3, article no. 469. DOI: 10.3390/s17030469.
11. Looney M. MEMS Vibration Monitoring: From Acceleration to Velocity. Analog Dialogue. 2017, vol. 51, no. 6, pp. 1–5.
12. Murphy Ch. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application. Part 1. Analog Dialogue. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 5–10.
13. ABB AbilityTM Smart Sensor. Condition monitoring for motors. Data Sheet. Available at: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A9867&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (Accessed February 10, 2020).
14. WEG Motor Scan. Ready for Industry 4.0. Datasheet. Available at: <https://static.weg.net/medias/h79/h18/WEG-Motor-Scan-50079311-datasheet-en.pdf> (Accessed February 10, 2020).
15. Endpoint 3XS. Assembled product Model No: AC00009. Sub-assembly part No: SA00005. Technical Datasheet. Rev. 11.05.2017. Available at: <https://fccid.io/2AJJIAC00009/User-Manual/Users-Manual-3418172.pdf> (Accessed February 10, 2020).
16. Endiio Retrofit Box. Condition Monitoring. Datasheet. Available at: <https://www.endiio.com/wp-content/uploads/2019/04/endiio-Retrofit-Box-1.pdf> (Accessed February 10, 2020).
17. Smart Motor Sensor (SMS). The condition of all your electric motors at your disposal anytime any-where. Test Motors. Available at: https://gallery.mailchimp.com/5519b9ddd5e5edf5d09d38001/files/0af7b458-82f9-4742-b403-62dbf5f65dc2/R.7_SMART_MOTOR_SENSOR_Ing_VER201906.pdf (Accessed February 10, 2020).

Поступила 13.02.2020; принята к публикации 02.03.2020; опубликована 25.03.2020

Пырко Сергей Анатольевич – главный конструктор
ООО «Бюро Системного Программирования», Москва, Россия

Митногло Алексей Михайлович – заместитель генерального директора по экономике и финансам
ПАО МАК «Вымпел», Москва, Россия

Ишметьев Евгений Николаевич – д-р техн. наук
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

References

1. Thomson W.T, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Applications Magazine. 2001, vol. 7, no. 4, pp. 26–34. DOI: 10.1109/2943.930988.
2. Safin N.R. et al. Diagnostics of asynchronous motor faults applying a spectral analysis of stator currents. *Energobezopasnost i energosberezhenie* [Energy Safety and Energy Economy], 2014, no. 3(57), pp. 34–39. (In Russ.)
3. Henaio H, Capolino G.-A., Fernandez-Cabanias M., Filippetti F., Bruzese C., Strangas E., Pusca R., Estima J., Riera-Guasp M., Hedayati-Kia Sh. Trends in fault diagnosis for electrical machines. A review of diagnostic techniques. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 31–42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651.
4. Vavilov V.E. et al. Studying an external magnetic field of an asynchronous electric motor. *Vestnik UGATU* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University], 2016, vol. 20, no. 1(71), pp. 122–127. (In Russ.)
5. Henaio H., Demian C., Capolino G.-A. A frequency-domain detection of stator-winding faults in induction machines using an external flux sensor. IEEE Transactions on Industry Applications. 2003, vol. 39, no. 5, pp. 1272–1279. DOI: 10.1109/TIA.2003.816531.
6. Intesar Ahmed, Manzar Ahmed, Kashif Imran, Muhammad Shuja Khan. Detection of eccentricity faults in machine using frequency spectrum technique. Int. J. of Computer and Electrical Engineering. 2011, vol. 3, no. 1, pp. 111–119. DOI: 10.7763/IJCEE.2011.V3.300.

7. Ewert P. Application of neural networks and axial flux for the detection of stator and rotor faults of an induction motor. *Power Electronics and Drives*. 2019, vol. 4(39), pp. 201–213. DOI: 10.2478/pead-2019-0001.
8. Weidong Li, Mechefske Ch.K. Detection of induction motor faults: a comparison of stator current, vibration and acoustic methods. *J. of Vibration and Control*. 2006, vol. 12, no. 2, pp. 165–188. DOI: 10.1177/1077546306062097.
9. Murphy Ch. Choosing the most suitable MEMS accelerometer for your application. Part 2. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 28–33.
10. Medina-Garcia J., Sánchez-Rodríguez T., Gómez Galán J.A., Delgado A., Gómez-Bravo F., Jiménez R. A wireless sensor system for real-time monitoring and fault detection of motor arrays. *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 3, article no. 469. DOI: 10.3390/s17030469.
11. Looney M. MEMS vibration monitoring: from acceleration to velocity. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 6, pp. 1–5.
12. Murphy Ch. Choosing the most suitable MEMS accelerometer for your application. Part 1. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 5–10.
13. ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring for motors. Data Sheet. Available at: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A9867&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (Accessed February 10, 2020).
14. WEG Motor Scan. Ready for Industry 4.0. Datasheet. Available at: <https://static.weg.net/medias/h79/h18/WEG-Motor-Scan-50079311-datasheet-en.pdf> (Accessed February 10, 2020).
15. Endpoint 3XS. Assembled product Model No: AC00009. Sub-assembly part No: SA00005. Technical Datasheet. Rev. 11.05.2017. Available at: <https://fccid.io/2AJIAC00009/User-Manual/Users-Manual-3418172.pdf> (Accessed February 10, 2020).
16. Endiio Retrofit Box. Condition Monitoring. Datasheet. Available at: <https://www.endiio.com/wp-content/uploads/2019/04/endiio-Retrofit-Box-1.pdf> (Accessed February 10, 2020).
17. Smart Motor Sensor (SMS). The condition of all your electric motors at your disposal anytime anywhere. Test Motors. Available at: https://gallery.mailchimp.com/5519b9ddd5e5edf5d09d38001/files/0af7b458-82f9-4742-b403-62dbf5f65dc2/R_7_SMART_MOTOR_SENSOR_Ing_VER201906.pdf (Accessed February 10, 2020).

Submitted 13/02/2020; revised 02/03/2020; published 25/03/2020

Sergey A. Pyrko – Chief Designer
LLC Bureau of System Programming, Moscow, Russia

Alexey M. Mitioglo – Deputy General Director for Economics and Finance
PJSC Interstate Joint Stock Corporation Vympel, Moscow, Russia

Evgeniy N. Ishmetyev – DrSc (Eng.)
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia