

DOI 10.23859/1994-0637-2017-5-80-1
УДК 681.518.5, 53.083.8, 621.398

© Андреев А.Н., Колесниченко Д.А., Колесниченко Н.М.,
Королёв Т.В., 2017

Андреев Александр Николаевич

Кандидат технических наук, доцент,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: aanccs@mail.ru

Andreev Aleksandr Nikolaevich

PhD in Technical Sciences, Associate
Professor, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: aanccs@mail.ru

**Колесниченко Дмитрий
Александрович**

Старший преподаватель, Вологодский
государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

Kolesnichenko Dmitrii Aleksandrovich

Lecturer, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

Колесниченко Наталья Михайловна

Старший преподаватель, Вологодский
государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: tuska35@gmail.com

Kolesnichenko Natalia Michailovna

Lecturer, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: tuska35@gmail.com

Королёв Тимур Викторович

Старший преподаватель, Вологодский
государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: t333@bk.ru

Korolev Timur Victorovich

Lecturer, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: t333@bk.ru

**МЕТОД И АЛГОРИТМ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ
ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ
ИНФОРМАЦИИ О ТОКАХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

**METHOD AND ALGORITHM OF
DIAGNOSTICS OF
METALLURGICAL PRODUCTION
CYCLIC ACTION MECHANISMS
BASED ON MEASURING CURRENTS
OF ELECTRICAL MACHINES**

Аннотация. Предложены метод и алгоритм диагностирования для комплексного решения задач технической диагностики применительно к оборудованию циклического действия, основанные на спектральном анализе токов электрических машин с дифференциацией гармоник и их амплитуд в виде диагностических признаков как для электрической, так и для механической части промышленного оборудования.

Abstract. The diagnostic method and algorithm are proposed for the complex solution of technical diagnostics problems with respect to cyclic action equipment. Proposed diagnostic method and algorithm are based on spectral analysis of electric machine currents with differentiation of harmonics and their amplitudes in the form of diagnostic features for electrical and mechanical parts of industrial equipment.

Ключевые слова: диагностирование, спектральный анализ, диагностический признак, система автоматизации, обработка информации

Keywords: diagnosis, spectral analysis, diagnostic feature, automation system, information processing

Введение

Использование методов и средств технической диагностики применительно к дорогостоящему оборудованию металлургического производства позволяет существенно повысить уровень логистического сервиса плановых и внеплановых ремонтно-восстановительных операций, уменьшить время восстановления, снизив тем самым издержки производства. Затратная составляющая как во времени, так и в финансовом смысле, минимизируется за счет снижения времени выявления возможных дефектов оборудования. Случайный характер времени поиска дефектов при использовании современных систем, методов и алгоритмов диагностирования в пределе может быть переведен в детерминированную плоскость с несущественными допущениями.

Очевидной задачей представляется интеграция подсистемы диагностирования в общую автоматизированную систему управления производством. Практические аспекты для решения задач технической диагностики реализуются в едином интегрированном программном комплексе на верхних уровнях автоматизации, где учитываются не только диагностические признаки объекта, но и формируются массивы статистических данных, позволяющие после их обработки на программно-алгоритмическом уровне строить эмпирические и эвристические модели, в том числе и для задач прогнозирования.

Основная часть

К последовательно решаемым задачам технической диагностики в краткой формулировке относятся: контроль работоспособности, поиск дефектов и прогнозирование технического состояния [3]. Для ремонтпригодных и восстанавливаемых объектов обычно решаются две первые задачи, а решение задач прогнозирования чаще всего декларируется на уровне примитивных гипотез и линий тренда, не обеспечивающих приемлемой точности прогноза даже на ближайшую перспективу. Следовательно, полноформатное решение всех трех задач на основе явно выраженных диагностических признаков возможно в рамках единого информационного пространства, формируемого в составе АСУ.

Реализация системы для решения всех задач технической диагностики, включая достоверное прогнозирование для объектов, представляющих собой механизмы циклического действия, возможна на основе системного и многовариантного анализа информации о токах электрической машины в системах управления, которые описаны в работах [1]–[2]. Вариативный анализ и обработка мгновенных значений токов электрической машины выполняется для повышения энергетической эффективности механизмов циклического действия за счет рекуперации энергии при торможениях электроприводов. При этом в системе реализованы алгоритмы обработки сигналов датчиков, которые включают разложение в ряд Фурье, фильтрацию и обратную свертку [3], которое описывается следующим выражением для дискретной системы:

$$x_p(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_p(k) \cdot e^{j \frac{2\pi}{N} n \cdot k}. \quad (1)$$

В ряду других исследований [4]–[5] подробно проанализировано, как различные дефекты и режимы работы влияют на гармонический состав (спектр сигнала) индукции электрической машины, а значит, и токов электрической машины. Поскольку электропривод в целом представляет собой единую электромеханическую систему, где электродвигатель связан электрической частью (обмотками) с другим электрическим оборудованием (пуско-регулирующей аппаратурой), а механической частью (ротором) – с механизмом. Следовательно, анализ гармонического состава токов электрической машины дает возможность судить о техническом состоянии как электрического, так и механического оборудования металлургического производства. Достоверность промежуточного вывода о такой возможности связана с тем, что изменяющиеся во времени механические силы и моменты однозначно отражаются на изменении электрических токов. Единство информационного пространства автоматизированной системы управления производственным комплексом позволяет естественным способом интегрировать подсистему диагностирования в его состав.

Интеграция подсистемы диагностирования в систему автоматизации производства показана на рис. 1. Выбранный способ диагностирования на основе вариативного анализа токов является косвенным, так как группа диагностических признаков ξ_i представляет собой отдельные гармонические составляющие токов электрической машины, привязанные к имеющемуся либо развивающемуся дефекту через амплитуду соответствующей гармоники [4].

Состоянию S оборудования отдельного класса механизмов, состоящего из системы различных механических и электрических устройств (блоков), будет соответствовать набор состояний отдельных узлов, характеризующихся набором диагностических признаков.

$$\begin{aligned} S &= f(s_1, s_2, \dots, s_n) \\ s_i &= f(\Xi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)). \end{aligned} \quad (2)$$

Если анализ информации проводится на «готовом» спектре, то о состоянии оборудования можно судить практически «мгновенно» на основании выявляемых диагностических признаков с последующим переходом к конкретизации состояния отдельных блоков системы. Пояснение реализации такого алгоритма для механизмов циклического действия металлургического производства представлено на рис. 2.

Алгоритм поиска дефектов можно назвать параллельно-последовательным, так как при анализе данных в точке Π_{00} определяется состояние соответствующих блоков системы $S_1 - S_4$ либо при невозможности определения состояния конкретного блока осуществляется ветвление до уровня доступных элементов электрической S_{01} или механической части системы S_{02} .

На рис. 3 представлен алгоритм работы. По спектру сигналов для определенных диагностических признаков выделяются соответствующие амплитуды гармоник и сравниваются с их эталонными значениями в допустимых пределах этого признака

$$\xi_i = \begin{cases} \xi_i < \xi_d^H - \text{нормальное состояние} \\ \xi_d^H \leq \xi_i < \xi_d^B - \text{допустимое состояние,} \\ \xi_i \geq \xi_d^B - \text{критическое состояние} \end{cases} \quad (3)$$

где ξ_d^B , ξ_d^H – верхний и нижний пределы эталонных значений диагностического признака.

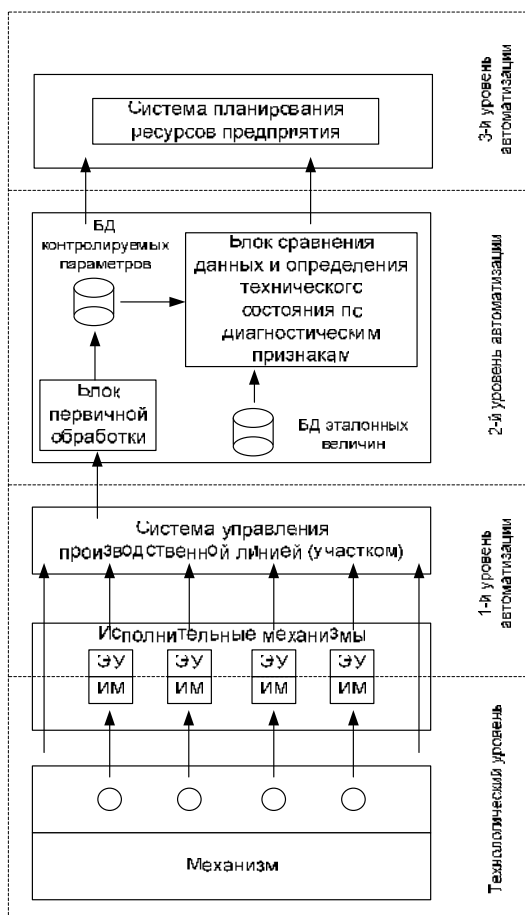


Рис. 1. Система автоматизации предприятия с подсистемой диагностирования
 На рис. 1 приняты следующие сокращения: ИМ – исполнительный механизм, ЭУ – электрический усилитель, БД – база данных

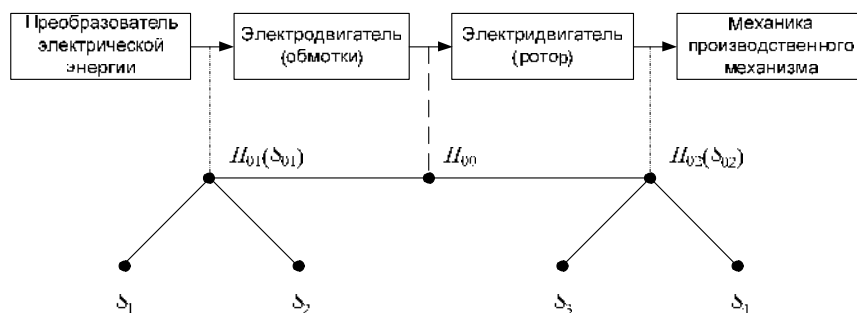


Рис. 2. Пояснение реализации алгоритма поиска дефектов

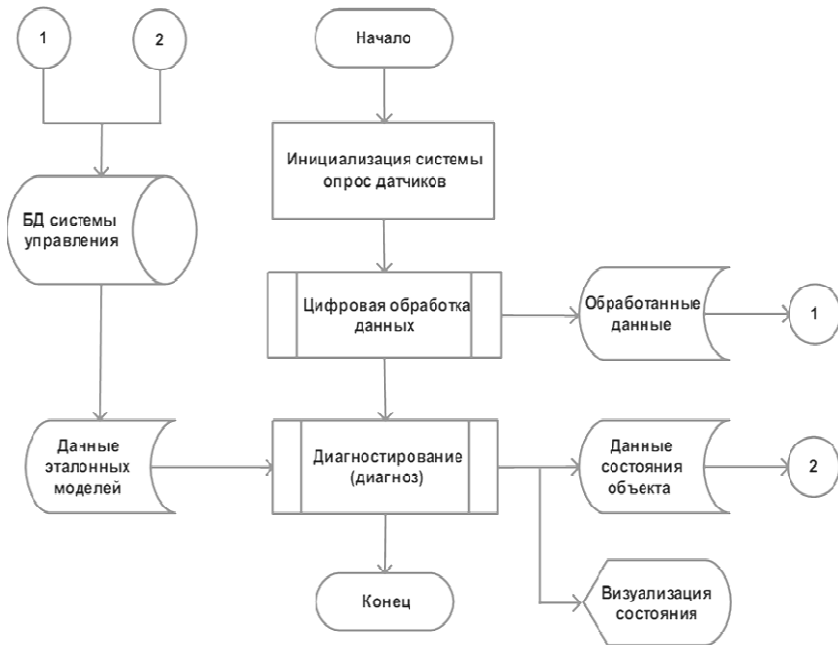


Рис. 3. Алгоритм проверки технического состояния системы и поиска дефектов

Представленный метод и алгоритм, реализуемый в системе, решает две из трех задач технической диагностики. Решение третьей задачи (прогнозирование) лежит в плоскости расчета отклонений величин соответствующих диагностических признаков в зоне допустимых значений и получения максимально достоверной линии тренда диагностического признака на последующие временные интервалы с учетом имеющихся статистических данных.

Для проверки возможности реализации системы был собран лабораторный стенд, на котором произведены исследования влияния различных дефектов на амплитуды гармонических составляющих тока электрической машины. Выше на графиках представлены спектры фазного тока машины при короткозамкнутом витке обмотки статора (электрическая часть, рис. 4) и при механическом дисбалансе системы (механическая часть, рис. 5). В представленных спектрах диагностическим признаком виткового замыкания является увеличение амплитуды третьей гармоники. Признак дисбаланса ротора проявляется в росте амплитуд гармоник с частотами 25 и 75 Гц. Другие дефекты, например: обрыв фазы, дефекты отливки обмотки ротора и диагностические признаки, им соответствующие, подробно рассмотрены в [4], [5].

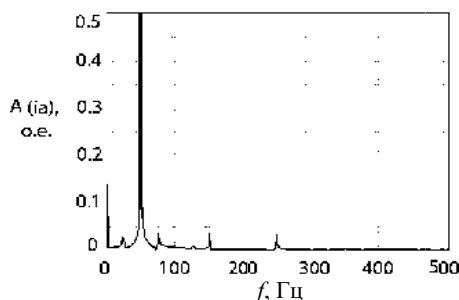


Рис. 4. Спектр тока при витком замыкании

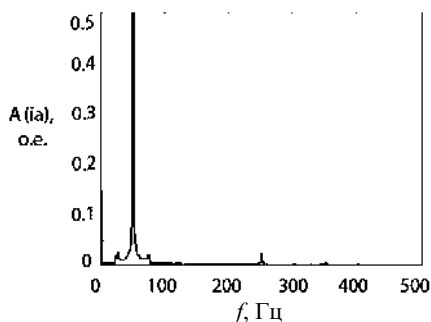


Рис. 5. Спектр тока при дисбалансе ротора

Выводы

В предложенном методе последовательно выполняются:

- спектральный анализ токов электрических машин;
- дифференциация спектра по гармоникам и объектам электромеханики;
- преобразование амплитуд выбранных гармоник в диагностические признаки, соответствующие имеющимся либо развивающимся дефектам электрической и механической части производственного комплекса;
- абсолютная либо допусковая оценка диагностических признаков;
- постановка диагноза на уровне АСУ.

Реализация предложенного способа, подкрепленная алгоритмом диагностирования, минимизирует и практически детерминирует случайную составляющую времени восстановления оборудования, связанную с поиском и оценкой дефектов.

Физический эксперимент с последующей цифровой обработкой данных свидетельствует о практической возможности реализации предложенного метода и алгоритма диагностирования для механизмов циклического действия металлургического производства.

Для полноформатного решения третьей задачи технической диагностики (прогнозирование) с обеспечением высокой достоверности прогноза потребуется существенное накопление массивов статистических данных. Выбор закона (законов) распределения вероятностей безотказной работы оборудования, построение прогностической модели и выбор способа экстраполяции на основе накапливаемых статистических данных не представляется очевидной задачей и не рассматривается в материалах статьи.

Литература

1. Андреев А.Н., Колесниченко Д.А. Вариативность методов первичной цифровой обработки сигналов датчиков в асинхронном электроприводе // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 4.1 (66). С. 203–206.
2. Андреев А.Н., Колесниченко Д.А., Колесниченко Н.М. Система управления исполнительными механизмами циклического действия с организацией канала первичной обработки сигналов датчиков при обеспечении режимов энергосбережения прокатного производства // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 3 (78). С. 12–19.
3. Калявин В.П., Мозгалецкий А.В., Галка В.Л. Надежность и техническая диагностика судового электрооборудования и автоматики. СПб.: Элмор, 1996. 296 с.
4. Колесниченко Д.А., Елюков А.С., Шейбухов С.Н. Быстродействующая система защиты и диагностирования асинхронных электродвигателей // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин,

приборов и оборудования: Материалы VII Международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГТУ, 2012. С. 186–188.

5. Шейбухов С.Н., Баданин Р.Л. О возможности защиты и диагностирования асинхронных электродвигателей по результатам непосредственного измерения индукции в поля рабочих зонах // Молодые исследователи – регионам: Материалы всероссийской научной конференции студентов и аспирантов. Вологда: ВоГТУ, 2009. Т. 1. С. 159–161.

References

1. Andreev A.N., Kolesnichenko D.A. Variativnost' metodov pervichnoi tsifrovoi obrabotki signalov datchikov v asinkhronnom elektroprivode [Variability of methods of primary digital processing of sensor signals in an asynchronous electric drive]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technology], 2016, no. 4.1 (66), pp. 203–206.

2. Andreev A.N., Kolesnichenko D.A., Kolesnichenko N.M. Sistema upravleniia ispolnitel'nyimi mekhanizmami tsiklicheskogo deistviia s organizatsiei kanala pervichnoi obrabotki signalov datchikov pri obespechenii rezhimov energosberezheniia prokatnogo proizvodstva [Control system of executive mechanisms of cyclic action with the organization of the channel of primary processing of sensor signals while providing energy-saving modes of rolling production]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2017, no. 3 (78), pp. 12–19.

3. Kaliavin V.P., Mozgalevskii A.V., Galka V.L. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika sudovogo elektrooborudovaniia i avtomatiki* [Reliability and technical diagnostics of ship electrical equipment and automatics]. St Petersburg: Elmor, 1996. 296 p.

4. Kolesnichenko D.A., Eliukov A.S., Sheibukhov S.N. Bystrodeistvuiushchaya sistema zashchity i diagnostirovaniia asinkhronnykh elektrodvigatelei [High-speed system for protection and diagnosis of asynchronous electric motors]. *Avtomatizatsiia i energosberezhenie mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo proizvodstva, tekhnologiya i nadezhnost' mashin, priborov i oborudovaniia: Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Automation and energy saving of machine-building and metallurgical production, technology and reliability of machines, devices and equipment: Materials of the VII International Scientific and Technical Conference]. Вологда: ВоГТУ, 2012, pp. 186–188.

5. Sheibukhov S.N., Badanin R.L. O vozmozhnosti zashchity i diagnostirovaniia asinkhronnykh elektrodvigatelei po rezul'tatam neposredstvennogo izmereniia induktsii v polia rabochikh zonakh [On the possibility of protection and diagnosis of asynchronous electric motors based on the direct measurement of induction in the fields of working zones]. *Molodye issledovateli – regionam: Materialy vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov i aspirantov* [Young Researchers to the Regions: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Students and PhD Students]. Вологда: ВоГТУ, 2009, Т. 1, pp. 159–161.

Андреев А.Н., Колесниченко Д.А., Колесниченко Н.М., Королев Т.В. Метод и алгоритм диагностирования объектов циклического действия металлургического производства на основе информации о токах электрических машин // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №5(80). С. 9–15.

For citation: Andreev A.N., Kolesnichenko D.A., Kolesnichenko N.M., Korolev T.V. Method and algorithm of diagnostics of metallurgical production cyclic action mechanisms based on measuring currents of electrical machines. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 5 (80), pp. 9–15.