

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Представлены результаты разработки программно-аппаратного комплекса диагностики электромеханических агрегатов по параметрам потребляемой электрической мощности. Описано подключение прототипа вышеупомянутого комплекса к лабораторному стенду для вибродиагностики электромеханического оборудования и полученные в результате возможности для экспериментальных исследований. Показаны полученные экспериментальные графики изменения значений основных параметров потребляемой электрической мощности электродвигателя во времени при различном уровне нагрузки на вал стенда.

**Ключевые слова:** диагностика электромеханического оборудования, программно-аппаратный комплекс, спектральный анализ, токовая диагностика, вибрационная диагностика.

**Введение.** Своевременное определение наличия и степени развития различных дефектов электромеханических агрегатов в процессе их работы является актуальной задачей. Основные современные методы и средства для решения вышеупомянутой задачи были ранее рассмотрены в работе [1]. Там же была показана и обоснована необходимость разработки специализированного программно-аппаратного комплекса для диагностики электромеханических агрегатов по параметрам потребляемой электрической мощности (далее — комплекса).

Одной из задач, поставленных при разработке комплекса, была задача сравнения существующих методов диагностики по параметрам потребляемой электрической мощности.

Целесообразность поставленной задачи обусловлена тем, что в процессе аналитического обзора различных источников [2–9] было установлено, что объективное сравнение различных методов диагностики на основании результатов исследований, публикуемых в научных статьях, является очень сложным процессом. Основной причиной этого представляется различие целей исследования, применяемого экспериментального оборудования, методов диагностики и способов их реализации. При этом достаточно часто авторы научных работ (например, [4, 7]) исследуют принципиальную возможность применения выбранного метода диагностики для обнаружения конкретных дефектов, не рассматривая такие важные для сравнения параметры, как точность метода, его вычислительную сложность, сложность аппаратной и программной реализации. Следует также отметить, что исходные данные (мгновенные значения токов и напряжений), являющиеся основой для расчетов при использовании практически любого метода диагностики по параметрам потребляемой электрической мощности у разных исследователей будут неизбежно отличаться при отсутствии общепринятых стандар-

тов или соглашений вследствие неизбежного различия материальных возможностей.

В связи с этим комплекс изначально разрабатывался таким образом, чтобы исходная выборка мгновенных значений удовлетворяла как можно большему количеству известных методов диагностики [1, 10].

**Описание разработанного прототипа комплекса.** Комплекс был разработан в виде двух отдельных приборов, условно называемых блоками: измерительного блока и блока обработки.

Измерительный блок реализован на базе измерительного преобразователя АЕТ [11], изготовленного по специальному заказу в ООО «Фирма «Алекто-Электроникс». Основное назначение измерительного блока — измерение параметров потребляемой электрической мощности в цепи питания диагностируемого электромеханического оборудования. Это такие параметры, как:

- среднеквадратические значения фазных токов;
- среднеквадратические значения фазных и междуфазных напряжений;
- средние значения фазных токов, фазных и междуфазных напряжений по всем трем фазам;
- среднеквадратические значения активной и реактивной мощности по каждой из фаз;
- средние значения активной, реактивной и полной мощности трехфазной системы;
- коэффициенты мощности по каждой из фаз;
- коэффициент мощности трехфазной системы.

Кроме того, измерительный блок оснащен функцией сохранения во внутреннюю энергонезависимую память не только вышеперечисленных параметров потребляемой электрической мощности, но и выборки мгновенных значений тока и напряжения, необходимых для последующего расчета диагностических параметров блоком обработки.

Блок обработки реализован в виде программно-обеспечения на базе персонального компьютера — ноутбука Dell Latitude 5411 со следующими характеристиками:

- процессор Intel Core i5 10400H;
- оперативная память 8 Гб;
- энергонезависимая память SSD 256 Гб;
- видеокарта NVIDIA GeForce MX250 2 Гб;
- экран 14" WVA/FHD(1920x1080);
- операционная система Windows 10 Professional.

Программное обеспечение блока обработки создано с использованием языка программирования С#. Основные функции программного обеспечения:

- 1) дистанционное управление измерительным блоком, заключающееся в изменении его настроек и контроле процесса измерения и формирования выборок мгновенных значений;
- 2) получение измерительной информации от измерительного блока;
- 3) хранение и систематизация накопленной измерительной информации;
- 4) математическая обработка измерительной информации с целью определения диагностических параметров в соответствии с одним из реализованных методов диагностики;
- 5) хранение и систематизация результатов математической обработки.

За реализацию каждой из вышеописанных функций отвечает отдельный программный модуль в составе программного обеспечения.

Первый модуль — модуль управления измерителем — предназначен для чтения, изменения и записи параметров конфигурации измерителя, а также обнаружения и регистрации возможных ошибок в его работе.

Второй модуль — модуль сбора данных — осуществляет опрос измерителя по заранее заданному алгоритму или же в ручном режиме. В зависимости от установленных параметров работы программного обеспечения это может быть непрерывный опрос текущих значений измеряемых параметров или получение сохраненных во внутренней памяти измерителя выборок либо мгновенных значений токов и напряжений, либо значений измеряемых параметров за определенный период времени. Кроме того, модуль сбора данных имеет функцию инициирования начала записи очередной выборки мгновенных значений во внутреннюю память измерителя.

Связь двух вышеописанных модулей с измерителем осуществляется по интерфейсу Ethernet или RS-485 в соответствии с установленным протоколом связи измерителя.

Третий модуль — модуль управления первичными данными — осуществляет сохранение полученных вторым модулем данных в файловой системе персонального компьютера по заранее установленным правилам, что должно упростить последующий доступ и обработку накопленных данных. Пятый модуль — модуль управления вторичными данными — выполняет те же самые действия, но только с уже обработанными данными; основные отличия с третьим модулем — разные подходы к формату хранения и отображения данных.

Четвертый модуль — модуль расчета диагностических параметров — является основной и наиболее сложной в вычислительном плане частью ПО. Этот модуль выполняет математическую обработку экспериментальных данных в рамках одного или

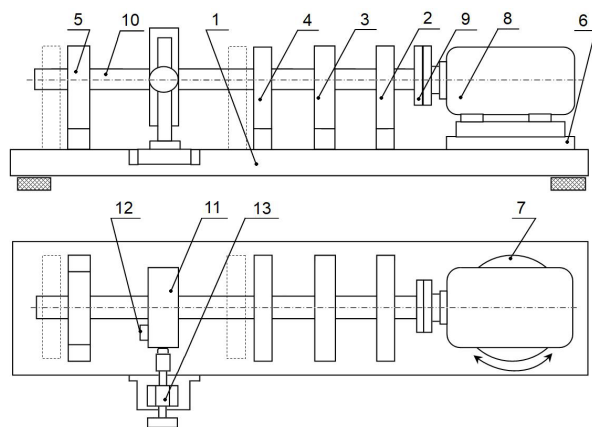


Рис. 1. Конструкция стенда

нескольких методов вычисления диагностических параметров.

Например, сигнатурный анализ осуществляется следующим образом: на основе выборки мгновенных значений тока и напряжения формируется массив значений активной мощности (или силы тока, в зависимости от выбранного варианта реализации данного метода), который подвергается быстрому преобразованию Фурье. После того как результаты расчета быстрого преобразования Фурье будут получены, программное обеспечение отображает полученный спектр на экране, чтобы пользователь мог на основе имеющихся исходных данных выделить значения гармоник на характерных частотах в соответствии с ГОСТ ISO 20958-2015 [12].

**Описание лабораторного стенда для вибродиагностики электромеханического оборудования.** Одной из основных проблем, возникших при разработке комплекса, стала необходимость получения экспериментальных данных с электромеханического оборудования, наличие и степень развития дефектов в которых известны заранее, или же необходимость подтверждать результаты диагностики другим методом, достоверность которого известна заранее.

Для решения вышеупомянутой проблемы было принято решение использовать в качестве диагностируемого объекта лабораторный стенд для вибродиагностики электромеханического оборудования (далее — стенд), применяемый кафедрой «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета для лабораторных работ по вибрационной диагностике.

Конструкция стенда показана на рис. 1.

На основании 1 стенда расположены четыре подшипниковые опоры (2, 3, 4 и 5), а также плита 6. Плита 6 может линейно перемещаться в поперечном направлении по пазу основания 1. На ней расположена вращающаяся плита 7. На плите 7 установлен асинхронный двигатель 8. Перемещение плиты 6 и вращение плиты 7 позволяют имитировать наиболее часто встречающиеся дефекты сборки — несоосность валов и перекос осей.

Ротор электродвигателя 8 с помощью пальцевой упругой муфты 9 передает крутящий момент и приводит во вращательное движение вал 10. Вал 10 опирается на подшипники различных типов, которые посажены в подшипниковые гнезда опор 2, 3, 4 и 5 и работают в различных эксплуатационных условиях.

В опоре 2 расположен радиальный подшипник, работающий без смазки («всухую»). В опоре 3 расположен радиально-упорный подшипник, работающий в смазке. Опора 4 имеет разрезную конструкцию, со вставленным зажимным винтом. При помощи винта можно изменять размер посадочного гнезда подшипника, тем самым имитируя часто встречающийся производственный дефект — несоответствие допуска подшипниковой посадки, приводящий к работе подшипника в аномальных условиях. Тип применяемого подшипника — радиально-упорный конический.

В опоре 5 (крайней) попеременно могут располагаться радиально-упорные однорядные подшипники, имеющие различные механические дефекты — раковины и трещины внутреннего и внешнего колец, разноразмерность шаров, повреждение сепаратора и прочие.

На валу 10 испытательного стенда расположен диск 11, в радиальном пазе которого может быть расположен грузик 12, способный перемещаться вдоль паза. При помощи грузика 12 искусственно создается дисбаланс при вращении. Характеристики дисбаланса можно варьировать, меняя местоположение грузика 12 в радиальном направлении, а также его массу. Также на диск 11, с помощью нагрузочного устройства 13, можно прикладывать различные по величине нагрузки, имитируя силовые воздействия, протекающие в зубчатых зацеплениях, или воздействие натяжения ремня на шкив.

Подшипниковые опоры 4 и 5 имеют возможность перемещаться вдоль вала 10 по специальным пазам на основании 1, изменяя межопорное расстояние.

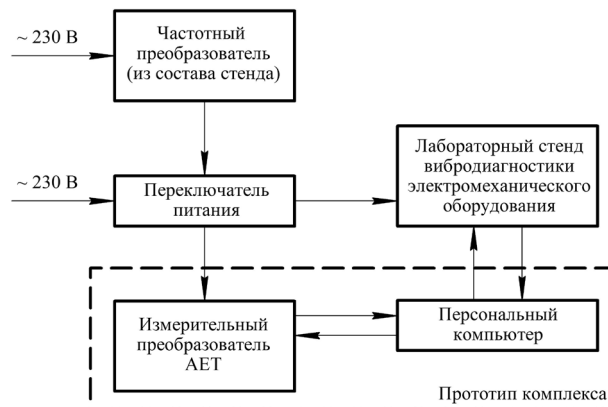


Рис. 2. Структурная схема подключения комплекса к стенду

Изменение частоты вращения ротора электродвигателя 8 осуществляется с помощью частотного преобразователя, питающего электродвигатель.

**Описание подключения комплекса к стенду.** Функциональная схема подключения прототипа комплекса к стенду приведена на рис. 2.

В разрыв цепи питания электродвигателя стенда подключен переключатель питания, сконструированный таким образом, чтобы обеспечить работу схемы в одном из двух режимов:

1. Измерительный преобразователь АЕТ подключен в разрыв цепи питания электродвигателя стенда, питание на преобразователь АЕТ поступает через переключатель питания.



Рис. 3. Осциллограммы параметров мощности трехфазной системы

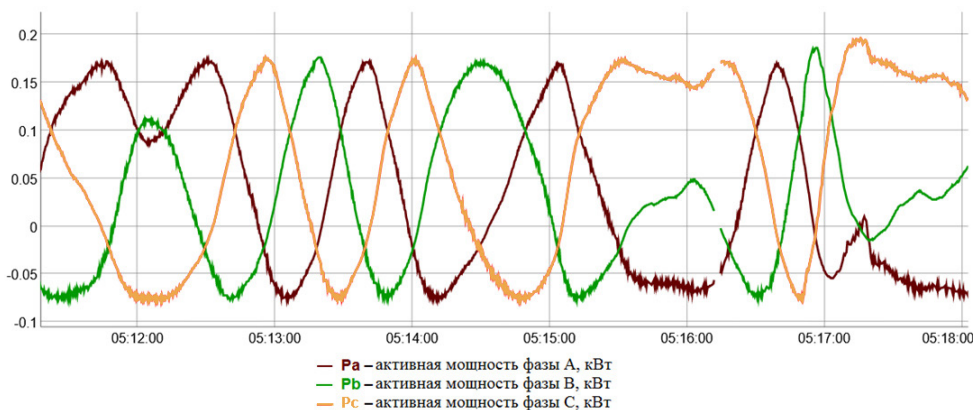


Рис. 4. Осциллограммы активной мощности по каждой из фаз

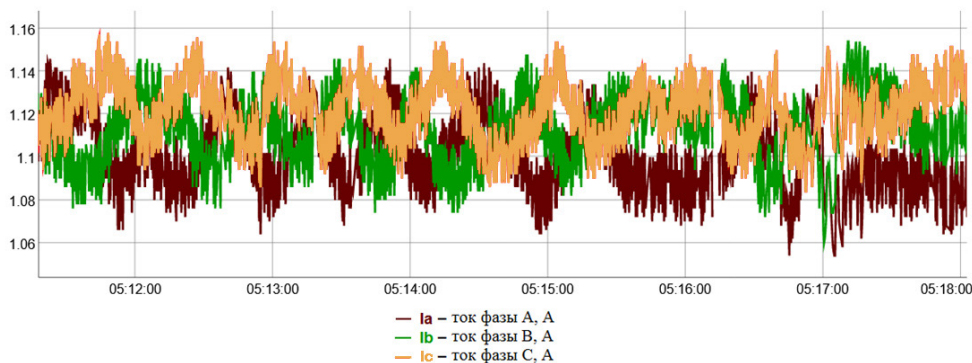


Рис. 5. Осциллограммы фазных токов

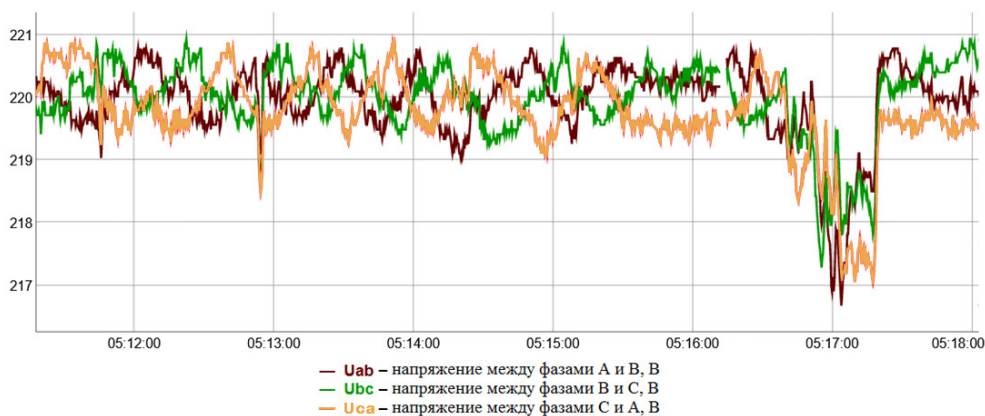


Рис. 6. Осциллограммы междуфазных напряжений

2. Измерительный преобразователь АЕТ не подключен к цепи питания электродвигателя стэнда, питание на преобразователь АЕТ не поступает, электродвигатель стэнда запитан напрямую от частотного преобразователя.

Второй режим работы схемы необходим на тот случай, если прототип комплекса по каким-либо причинам (например, для доработки аппаратной части) будет необходимо отключить от стэнда. При этом стэнд можно будет использовать по его прямому назначению.

Персональный компьютер осуществляет сбор и обработку экспериментальных данных, а также управление как стэндом, так и измерительным преобразователем АЕТ.

**Результаты экспериментов.** Было проведено исследование влияния механической нагрузки на электрические параметры мощности, потребляемой электродвигателем стэнда. Полученные осциллограммы приведены на рис. 3–6.

После установления постоянной скорости вращения вала стэнда, равной 50 Гц, в течение примерно пяти минут свободно вращался (подшипники на валу соответствуют описанию стэнда). Затем на некоторое время (около 05:17:00 на осциллограммах) нагрузка на вал с помощью нагрузочного устройства была увеличена. После снятия нагрузки вал до конца испытания находился в состоянии свободного вращения.

Измеренные параметры поступали через интерфейс RS-485 при частоте опроса, равной 10 Гц.

Анализ осциллограмм показывает, что изменение механической нагрузки однозначно фиксируется изменением потребляемых активной и реак-

тивной мощностей трехфазной системы (рис. 3). Также при изменении нагрузки на вал происходит скачкообразное уменьшение величины междуфазных напряжений (рис. 6).

**Выводы.** Представленные результаты разработки программно-аппаратного комплекса отражают текущие достижения авторов в области диагностики работы электромашинных агрегатов по параметрам потребляемой электрической мощности. Использование прототипа комплекса совместно с лабораторным стэндом для вибрационной диагностики электромеханического оборудования позволяет получать экспериментальные данные с известными параметрами развития дефектов исследуемого электромеханического агрегата, а также сравнивать результаты диагностирования с результатами вибродиагностики.

Работоспособность предложенной схемы подключения комплекса к стэнду подтверждена результатами первых экспериментальных исследований влияния нагруженности вала стэнда на значения параметров потребляемой электрической мощности электродвигателя.

#### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90166.

#### Библиографический список

1. Gordeev O. I., Zakharenko V. A. Diagnostics of electromechanical equipment by electrical power consumption



parameters // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1546. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012014.

2. Cruz S. M. A., Cardoso A. J. M., Toliyat H. A. Diagnosis of stator, rotor and airgap eccentricity faults in three-phase induction motors based on the multiple reference frames theory // IEEE, 38th Industry Applications Society Annual Meeting. 2003. Vol. 2. P. 1340–1346.

3. 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. 2013. P. 279–288. DOI: 10.1109/WEMDCD.2013.6525187.

4. Jung J. H., Lee J. J., Kwon B. H. Online diagnosis of induction motors using MCSA // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. Vol. 53, no. 6. P. 1842–1852. DOI: 10.1109/TIE.2006.885131.

5. Баширов М. Г., Прахов И. В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: моногр. Уфа: Изд-во УГНТУ. 2013. 96 с.

6. Завидей В. И., Свиридов М. А., Рущинский В. Н. Состояние и перспективы внедрения систем мониторинга и технического диагностирования электрических машин и аппаратов // Экспозиция. Нефть. Газ. 2019. № 1. С. 68–72.

7. Петухов В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. 2008. № 1. С. 33–37.

8. Сидельников Л. Г., Афанасьев Д. О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 127–137.

9. Пат. 2431152 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом / Кузеев И. Р., Баширов М. Г., Прахов И. В., Баширова Э. М., Самородов А. В. № 2009143292/28; заявл. 23.11.09, опубл. 10.10.11, Бюл. № 28.

10. Гордеев О. И., Захаренко В. А. Программное обеспечение обработки параметров потребляемой мощности для

диагностики электромеханических агрегатов // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. С. 329–337.

11. Цифровые многофункциональные измерительные преобразователи АЕТ111, АЕТ211, АЕТ311, АЕТ411. URL: <http://alektogroup.com/preobrazovateli-aet.html> (дата обращения: 28.01.2022).

12. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. Введ. 2016–11–01. Москва: Стандартинформ, 2016. 27 с.

**ГОРДЕЕВ Олег Игоревич**, аспирант кафедры «Электроника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5067-8328

AuthorID (РИНЦ): 1052015

Адрес для переписки: [oki.gordeev\\_ai@rambler.ru](mailto:oki.gordeev_ai@rambler.ru)

**ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2501-4655

AuthorID (РИНЦ): 685994

ResearcherID: E-5359-2014

Адрес для переписки: [zaha\\_vl@mail.ru](mailto:zaha_vl@mail.ru)

#### Для цитирования

Гордеев О. И., Захаренко В. А. Программно-аппаратный комплекс диагностики электромеханических агрегатов // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 125–129. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-125-129.

Статья поступила в редакцию 02.02.2022 г.

© О. И. Гордеев, В. А. Захаренко