

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-52-83:656.56

Олег Викторович Крюков

ООО «ТСН-электро», доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Алексей Руфимович Колганов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: alex_37@list.ru

Игорь Васильевич Гуляев

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», доктор технических наук, профессор, руководитель НОЦ «Энергоэффективные двигатели двойного питания», Россия, Саранск, телефон (8342) 476669, e-mail: ivgulyaev@mail.ru

Автоматизация процессов диагностики асинхронных электродвигателей на компрессорных станциях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Статистический анализ критических дефектов приводных агрегатов компрессорных станций показывает, что основными причинами выхода из строя двигателей являются неисправности подшипников и обмоток статоров. Существующие системы диагностики технического состояния приводных электродвигателей, построенные по устаревшим методикам автономного измерения электрических, механических и тепловых параметров, не обеспечивают получения достоверных результатов. В связи с этим создание комплексной системы оперативной диагностики асинхронных электродвигателей является актуальным.

Материалы и методы. Для выявления повреждений электродвигателя использован метод спектрального анализа тока статора и его программно-аппаратная реализация.

Результаты. Предложены метод достоверного определения причин повреждений электродвигателей по спектральному составу гармоник тока и устройство его реализации, позволяющие своевременно, на ранних стадиях выявлять многие дефекты электродвигателей и приводных механизмов, а именно: локализацию повреждений электрических частей статора и ротора; эксцентриситет; износ подшипников; несоосность валов двигателя и механизма, ременных и зубчатых передач, рабочих узлов (лопастей и поршней) компрессоров.

Выводы. Использование разработанной универсальной системы диагностики технического состояния электродвигательных устройств компрессорных станций позволяет сокращать трудозатраты на поиск неисправностей электродвигателей и приводных механизмов, выявлять на ранних стадиях дефекты оборудования, эффективно планировать ремонтные работы, повышать энергоэффективность энергетического оборудования.

Ключевые слова: диагностика электродвигателя, спектр гармоник тока, метод мониторинга электродвигателей, повышенная вибрация двигателей

Oleg Viktorovich Kryukov

TCN-Electro LLC, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor, Deputy Director of Science, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Alexey Rufimovich Kolganov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electric Drive and Industrial Installations Automation Department Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: alex_37@list.ru

Igor Vasilievich Gulyaev

National Research Ogarev Mordovia State University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of the Scientific and Educational Center "Energy-Efficient Doubly-fed Motors", Russia, Saransk, telephone (8342) 47-66-69, e-mail: ivgulyaev@mail.ru

Automation of diagnostic processes of asynchronous electric motors at compressor stations

Abstract

Background. Statistical analysis of critical defects of drive units at compressor station shows that bearing and stator winding faults are the main reasons of motor failure. Existing systems for diagnosing the technical condition of drive electric motors developed on outdated methods of autonomous measurement of electrical, mechanical and thermal parameters do not provide reliable results. In this regard, the development of a comprehensive system for operational diagnostics of asynchronous electric motors is relevant.

Materials and methods. The authors have used the method of spectral analysis of the stator current to detect damage of electric motors and its hardware and software implementation.

Results. A method has been proposed for reliable determination of the causes of damage of electric motors based on the spectral composition of current harmonics and a device for its implementation. The use of the proposed diagnostic method allows incipient failure detection of electric motors and drive mechanisms. They are detection and localization of damage of the electrical parts of the stator and rotor, eccentricity, bearing wear, misalignment of the motor and mechanism shafts, belt and gear transmissions, working units (blades and pistons) of compressors.

Conclusions. The use of the developed universal diagnostic system for the technical condition of electric motor devices of compressor stations allows us to reduce labor costs for troubleshooting electric motors and driven mechanisms, identify equipment defects at early stages, effectively plan repair work, and increase the energy efficiency of power equipment.

Key words: electric motor diagnostics, current harmonic spectrum, electric motor monitoring method, increased motor vibration

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.076-084

Введение. В настоящее время самым распространенным потребителем электроэнергии на объектах нефтегазовой отрасли является асинхронный электродвигатель [1–3] с короткозамкнутым ротором (АД) различной мощности, используемый для привода насосов, вентиляторов, компрессоров. Так, на Починковской компрессорной станции (КС) общее количество таких АД составляет 1113 единиц суммарной мощностью 15614 кВт. В основном они используются для привода насосных установок (НУ), вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа (АВОГ) и пожарных систем (ПНС) [4–7]:

– в технологических установках обеспечения транспорта газа – 480 ед. мощностью 13710 кВт;

– во вспомогательных системах – 633 ед. мощностью 1904 кВт.

В среднем в течение года при проведении планово-предупредительных ремонтов (ППР) на данной КС выявляется около 10–15 критических дефектов АД, которые могут привести к отказу во время работы [8–11]. Согласно статистическим данным, основными причинами отказа двигателей являются неисправности подшип-

ников и обмоток статоров. Для выяснения причин, приводящих к отказам, в результате проведения внеочередной проверки технического состояния АД было установлено [12–15], что многие двигатели работают в штатном режиме с повышенной вибрацией и значительной разницей потребляемых токов по фазам.

Статистика повреждаемости и причины отказов АД. Согласно данным [16–19], количество выявленных в течение трех лет дефектов составило: в 2013 г. – 14; 2014 г. – 12; 2015 г. – 15. Причем 63 % дефектов – в подшипниках, 19 % – в обмотках статора, 15 % – в стержнях ротора, 3 % – прочее.

Регламент проверки технического состояния АД в соответствии с нормативно-технической документацией ППР включает [20–22]:

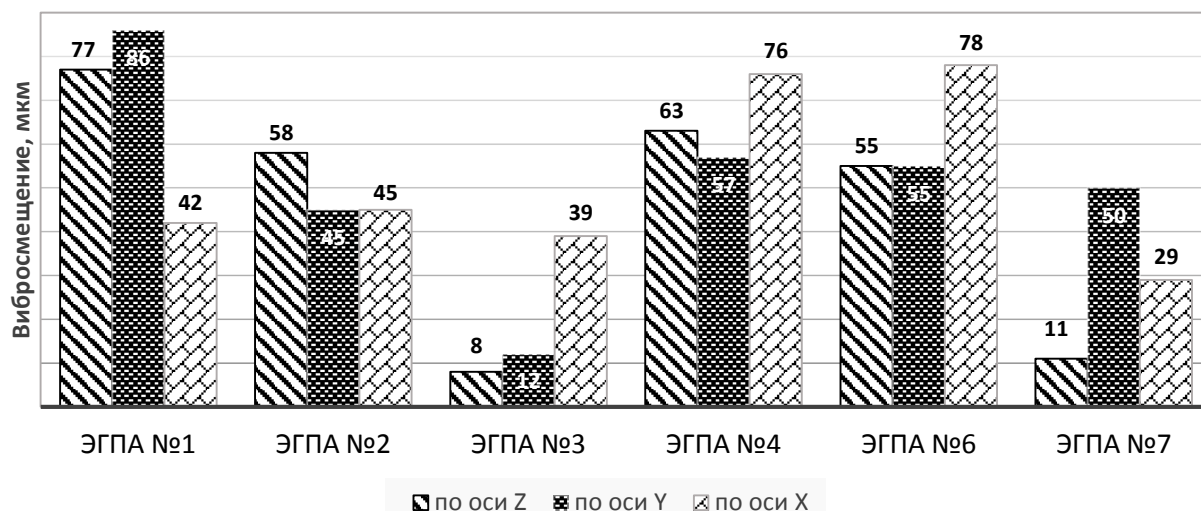
- 1) измерение сопротивления изоляции;
- 2) измерением потребляемого тока;
- 3) проверку состояния соединительных муфт;
- 4) измерение размаха вибросмещения;
- 5) проверку состояния подшипников;
- 6) проверку крепления электродвигателя.

Если, например, по результатам проверок имеются отклонения по пунктам 2 и 4, а остальные соответствуют нормам и к АД замечаний нет, то необходимы дальнейшие количественные исследования.

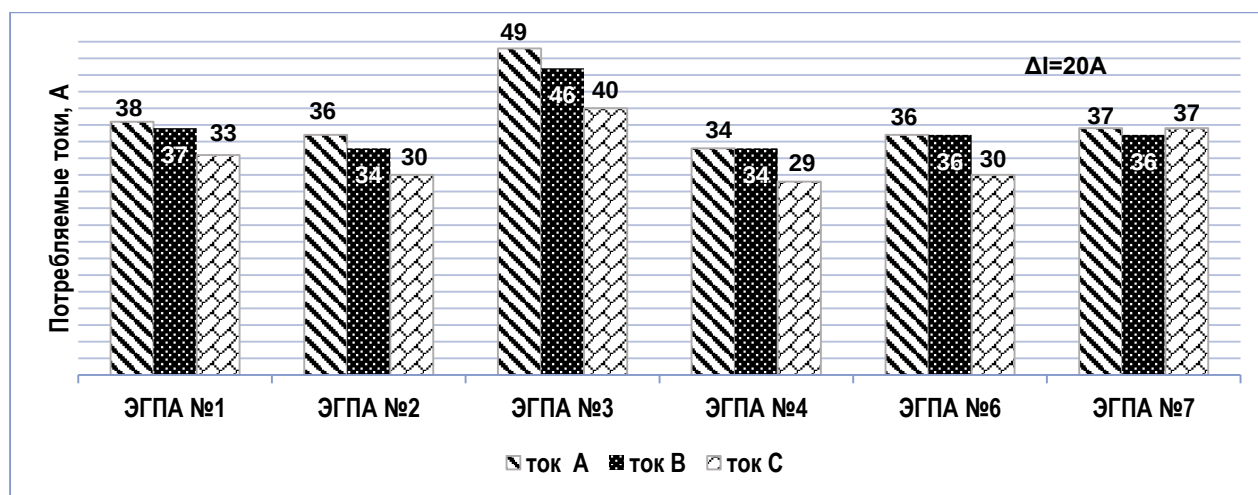
На диаграммах рис. 1 представлены результаты измерений вибросмещений (а) и значений фазных токов (б) электродвигателей типа ВАО82 мощностью 55 кВт, используемых для привода насосов уплотнения в компрессорном цехе (КЦ) «Ямбург-Елец_1». Эти электродвигатели работают с одинаковой нагрузкой на валу и получают питание от одного источника. При

этом наблюдается значительный разброс указанных параметров. Так, максимальная разница по фазным токам составляет 20 А. Аналогичная картина наблюдается и на других КЦ.

В большинстве случаев размах вибросмещения на электродвигателях значительно снижается при отсоединении двигателя от механизма. Так, например, для КЦ с ЭГПА №2 размах вибросмещения по оси Z уменьшился при отсоединении механизма (насосной установки №1) с 95 до 8,9 мкм, а для КЦ с ЭГПА №7 (по оси X) – с 78 до 19 мкм.



а)



б)

Рис. 1. Результаты измерений технического состояния электродвигателей ВАО82-2У2 мощностью $P = 55$ кВт ($n = 2950$ об/мин) на 7 КЦ с ЭГПА: а – по вибросмещению; б – по потребляемым токам

В соответствии с полученными данными по вибросмещению и токам потребления, можно с высокой достоверностью констатировать, что основной причиной отказа двигателей является повышенная вибрация, которая, в первую очередь, приводит к быстрому износу подшипников и возникновению эксцентриситета ротора (статического, динамического или сме-

шанного). При любом эксцентриситете ротора электродвигателя происходит:

- нарушение равномерности магнитного зазора и, как следствие, рост энергопотребления на 15–30 %, что подтверждается проведенными замерами;
- механическое задевание ротора о статор при вращении, приводящее к пробое изо-

ляции обмоток и перегреву сердечников с перекосом фаз;

- увеличение потерь в стали и времени разгона машины, что в конечном итоге приводит к преждевременному выходу из строя электродвигателя.

Как правило, причин, способных вызвать вибрации электродвигателей и приводных механизмов, достаточно много. К первой группе таких причин относятся:

- неправильная центровка двигателя с механизмом;
- неудовлетворительное состояние соединительной муфты;
- небаланс ротора приводного механизма;
- дефекты подшипников приводного механизма;
- дефекты фундаментов и нарушения креплений к ним двигателя;
- дефекты ременных и зубчатых передач редукторов;
- дефекты насаженных на вал механизма рабочих узлов (лопасти, поршни, эксцентрики).

Ко второй группе причин вибрации электродвигателей относятся:

- небаланс ротора электродвигателя;
- трещины, обрывы стержней, короткие замыкания в обмотке ротора;
- частичные отрывы бочки ротора от вала;
- изгиб или излом вала ротора;
- ослабление крепления отдельных частей двигателя;
- увеличенные зазоры в подшипниках качения;
- магнитная несимметрия поля (изменение зазора между статором и ротором).

При этом достоверно определить причины в конкретных случаях, не имея современного диагностического оборудования, очень сложно.

Методы и средства мониторинга технического состояния АД. На сегодняшний день существует несколько методов диагностики технического состояния электродвигателей

(см. таблицу), однако каждый из них имеет свои недостатки. Наиболее оптимальным для условий КС является метод измерения и анализа электрических параметров электродвигателя (5).

В этой связи для оперативной диагностики АД необходимо создание универсальной системы, работающей на физическом принципе, при котором любые возмущения в работе электрической и механической частей АД и связанного с ним исполнительного механизма приводят к модуляции потребляемого тока. Наличие в спектре тока характерных частот определенной величины свидетельствует о наличии тех или иных повреждений. Диагностическая система мониторинга АД включает (рис. 2):

- датчики фазного тока питающего напряжения;
- кондиционер сигнала (для нормализации и фильтрации сигналов);
- аналого-цифровой преобразователь с USB-интерфейсом;
- ПК с необходимым ПО для анализа, оценки и диагноза состояния.

Для создания диагностической системы необходим модуль аналого-цифрового преобразователя типа E20-10 и штатные составляющие системы: датчики тока типа AC1005 Tolema в комплекте с нагрузочным резистором $R_n = 100 \text{ Ом}$; элементы RC-цепей в печатных платах цифровых систем возбуждения и ПК типа Notebook. Внешний вид устройства диагностики показан на рис. 3.

Для анализа полученных значений токов можно использовать программу «ЭльГраф», которая представляет собой многоканальный регистратор-самописец и обладает достаточно большими возможностями в комплекте с оборудованием «ЭльКард». Основные функции программно-аппаратного комплекса: регистрация и визуализация данных; файловые операции и работа с блоками; подключение внешних плагинов и обработка данных на спектроанализаторе (рис. 4).

Методы диагностики АД и их основные недостатки

Методы диагностики АД	Основные недостатки
1. Измерение и анализ вибраций отдельных элементов агрегата	Сложность интерпретации результатов измерений при электрических повреждениях
2. Измерение и анализ акустических колебаний работающей машины	Недостаточная чувствительность к электрическим повреждениям
3. Измерение и анализ вторичных электромагнитных полей машины	В настоящее время не выпускается необходимое оборудование
4. Измерение и анализ температуры отдельных элементов машины	Непригоден для контроля внутренних повреждений изоляции
5. Измерение и анализ электрических параметров машины	Наличие в спектре гармоник тока частот, обусловленных коммутацией ключей регулируемого привода

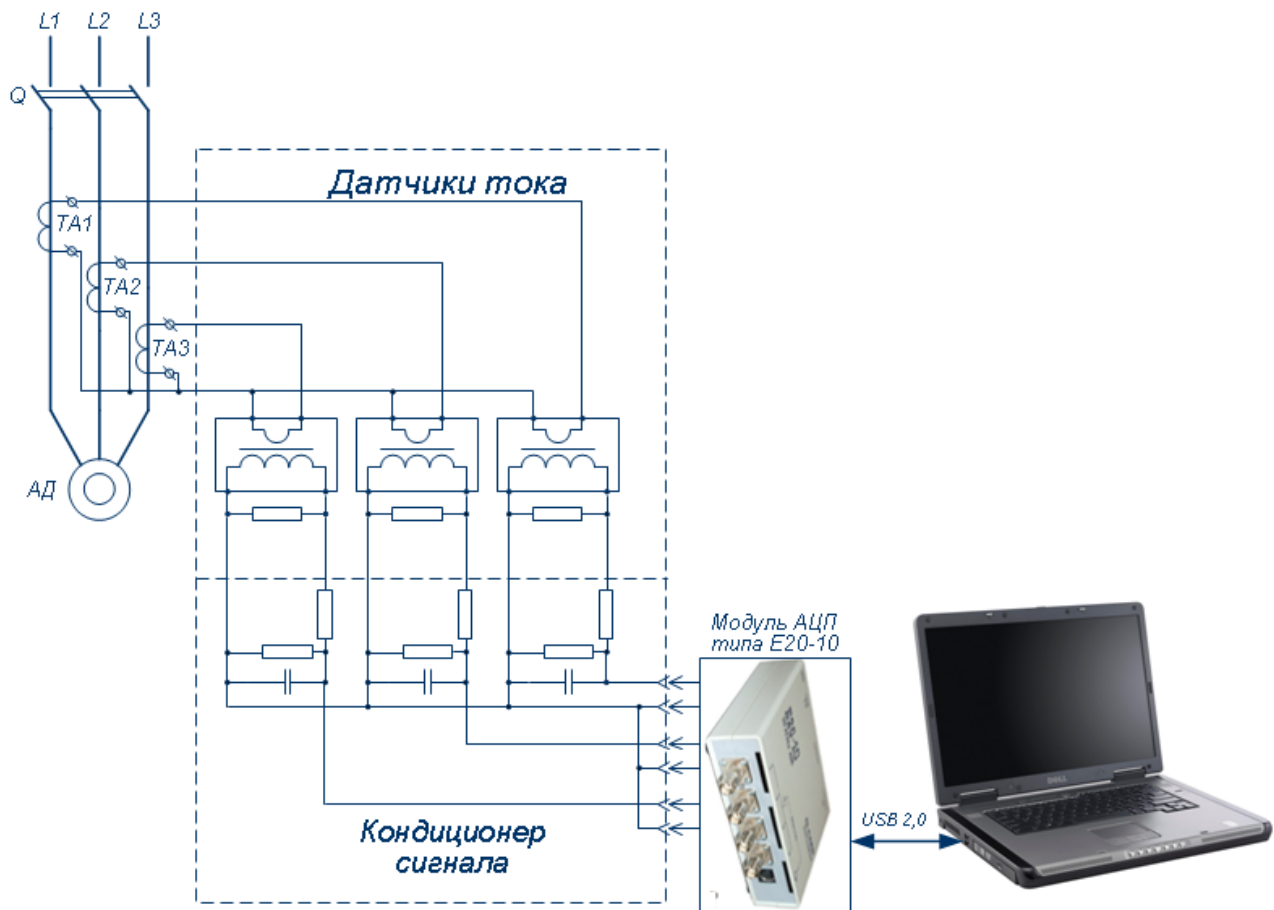
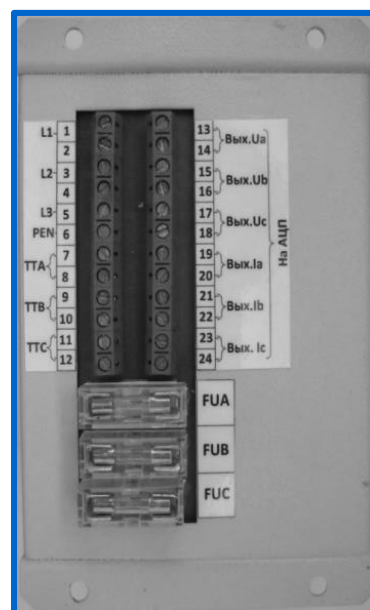


Рис. 2. Функциональная схема диагностической системы мониторинга АД



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид устройства диагностики (а); вид сзади (б)

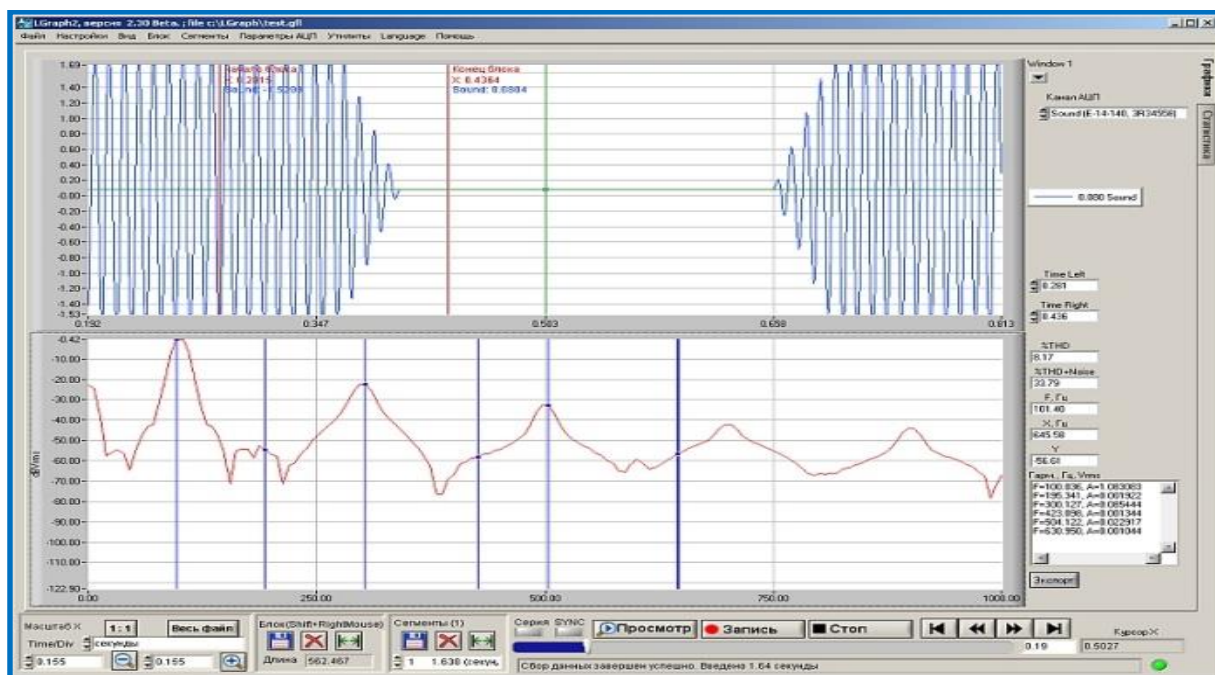


Рис. 4. Окно регистрации данных после спектроанализатора

Результаты мониторинга электродвигателей. Использование предлагаемого метода диагностики позволяет своевременно, на ранних стадиях выявлять многие дефекты АД и приводных механизмов. Достоинствами метода являются: простота эксплуатации; низкая стоимость оборудования; диагностирование оборудования при реальных условиях эксплуатации; возможность удаленного мониторинга всех основных узлов; отсутствие необходимости вывода оборудования в ремонт.

Метод мониторинга обеспечивает:

- определение и локализацию повреждений электрических частей статора и ротора АД;
- анализ изменения формы воздушного зазора (эксцентриситет);
- определение недопустимого износа подшипников;
- фиксацию несоосности валов АД и механизма, дефектов муфт;
- определение дефектов ременных и зубчатых передач;
- выявление дефектов рабочих узлов (лопастей и поршней).

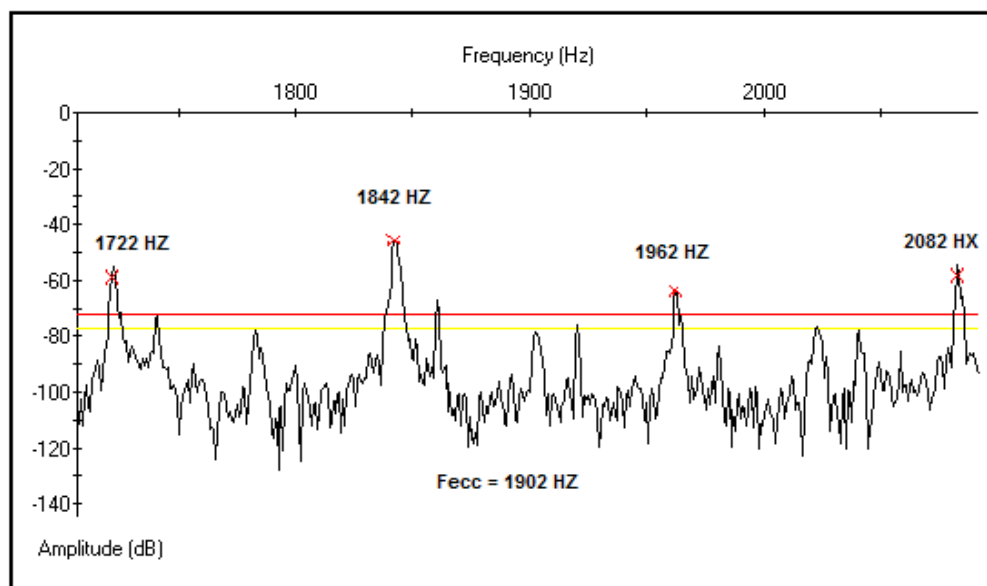
Учитывая, что каждому виду повреждения соответствует своя характерная частота, по спектру тока можно выявить возникающие дефекты. На рис. 5,а показан спектр тока двигателя при наличии эксцентриситета. На рис. 5,б и 5,в показаны спектры токов одного и того же АД соответственно с исправным и поврежденным подшипником. Анализ спектра на рис. 5,в показывает, что на частоте 150 Гц наблюдается рост амплитуды колебаний до -80 дБ, что свидетельствует о наличии механической неисправности.

Алгоритм анализа спектральных составляющих тока АД, например, при наличии эксцентриситета следующий:

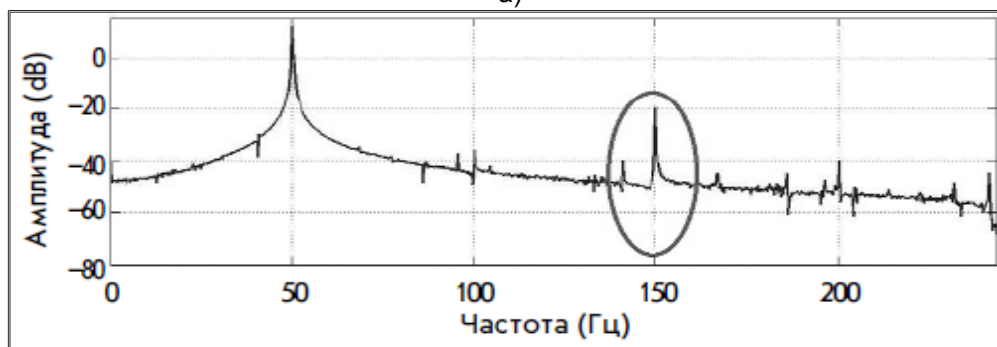
- анализ изменений воздушного зазора в электродвигателе;
- определение изменений плотности магнитного потока в зазоре;
- сопоставление данных по изменению потребляемого тока в фазах;
- анализ частотных компонентов потребляемого тока по известным аналитическим выражениям [23–25].

При полном анализе работоспособности всей линейки АД на КС необходимо учитывать эксплуатационные факторы, включая наработку до отказа. Например, суммарная наработка электродвигателей насосных установок на КС за 2020 год составила более 27 тыс. ч, при этом потребление электрической энергии превысило более 1,8 млн кВт·ч.

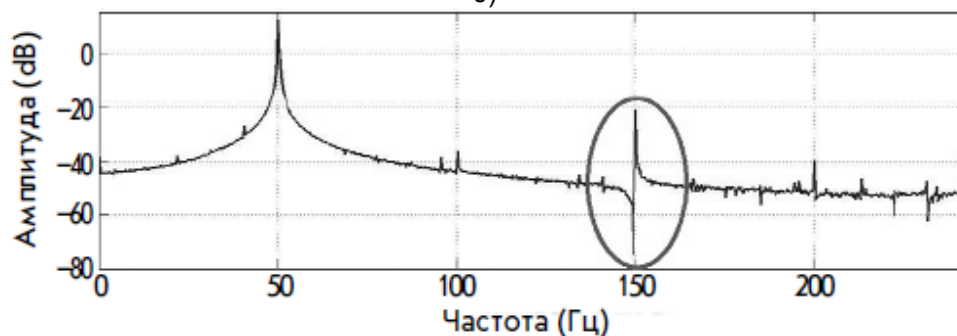
Согласно проведенным замерам, практически на всех электродвигателях насосных установок имеется повышенная вибрация, которая неизбежно приводит к возникновению эксцентриситета ротора и, соответственно, повышенному энергопотреблению. По результатам проведенных расчетов, суммарный расход электрической энергии за год у двигателей, имеющих эксцентриситет, увеличивается более чем на 120 тыс. кВт·ч общей стоимостью более 350 тыс. руб. В расчетах используются электродвигатели НУ в количестве 36 ед. мощностью 55 кВт с суммарной наработкой за 2015 год более 27 тыс. ч, исходя из одного работающего двигателя на агрегат.



а)



б)



в)

Рис. 5. Спектры тока АД: а – при наличии эксцентриситета; б – при исправных подшипниках; в – при поврежденном подшипнике

Выводы. Таким образом, реализация на практике новых методов и систем мониторинга электродвигателей позволяет достичь:

1) сокращения трудозатрат на поиск неисправностей электродвигателей и приводимых ими механизмов.

2) выявления дефектов оборудования на начальных стадиях развития;

3) эффективного планирования ремонтных работ по фактическому состоянию оборудования;

4) сведения к минимуму возможностей возникновения аварий;

5) повышения энергоэффективности энергетического оборудования.

Список литературы

1. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, В.И. Воронков и др. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – Т. 1. – 570 с.
2. Babichev S.A., Bychkov E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2007. – Vol. 81. – P. 489–492.
3. Зюзев А.М., Метельков В.П., Михальченко С.Г. Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока на КС МГ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 1. – С. 88–96.
4. Васенин А.Б., Степанов С.Е. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 11. – С. 52–58.

5. **Степанов С.Е., Бычков Е.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа // Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. АЭП-2016. – Пермь, 2016. – С. 428–432.

6. **Васенин А.Б.** Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // «Великие реки 2017». Труды XIX Междунар. науч.-промышл. форума: в 3 т. – Н. Новгород: НГАСУ, 2017. – С. 93–96.

7. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, В.И. Воронков и др. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2011. – Т. 2. – 664 с.

8. **Крюков О.В.** Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58.

9. **Киянов Н.В.** Решение задач промышленной экологии средствами электрооборудования и АСУТП // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 29–34.

10. **Репин Д.Г.** Системы оперативного мониторинга состояния энергоустановок для энергетической безопасности КС // Газовая промышленность. – 2014. – № 5(712). – С. 84–90.

11. **Крюков О.В.** Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2015.

12. **Kryukov O.V.** Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 56–62.

13. **Гуляев И.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б.** Разработка прикладного программного обеспечения для системы геотехнического мониторинга газопроводов // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25, № 6(288). – С. 48–59.

14. **Рубцова И.Е., Степанов С.Е.** Нейронечеткие модели и алгоритмы управления и мониторинга машин большой мощности // Материалы VI НТК «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010) ОАО «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”». – СПб., 2010. – С. 160–162.

15. **Степанов С.Е.** Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих КС // Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК / под ред. М.А. Щербакова. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2013. – С. 29–32.

16. **Крюков О.В.** Опыт проектирования АСУ ТП нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 1. – С. 2–7.

17. **Степанов С.Е.** Выбор методов мониторинга и прогнозирования технического состояния автоматизированных электроприводов энергетических объектов // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 11. – С. 32–39.

18. **Бабичев С.А., Захаров П.А.** Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 6. – С. 3–6.

19. **Захаров П.А., Киянов Н.В.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования электродвигателей // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 11. – С. 43–49.

20. **Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В.** Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. – 2017. – № 8(756). – С. 84–89.

21. **Репин Д.Г.** Концепты систем мониторинга технического состояния компрессорных станций // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 12. – С. 30–35.

22. **Воронков В.И., Рубцова И.Е.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при

проектировании объектов ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2013. – № 7(693). – С. 74–78.

23. **Мониторинг** и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики / Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, А.П. Сарычев, Н.О. Кобельков. – М.: АО «ВНИИЭМ», 2017.

24. **Захаров П.А., Киянов Н.В.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования электроприводных ГПА // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 11. – С. 43–49.

25. **Гуляев И.В., Теплухов Д.Ю.** Байесовские модели принятия решений при техническом обслуживании АЭП // Известия вузов. Электромеханика. – 2022. – № 3. – С. 49–55.

References

1. Puzhaylo, A.F., Spiridovich, E.A., Voronkov, V.I., Kadin, V.I., Kryukov, O.V., Rubtsov, I.E., Stepanov, S.E., Titov, V.G., Papkov, B.V., Baranov, V.G., Milov, V.R., Sokolova, E.S., Bychkov, E.V., Zakharov, P.A., Mel'nikov, V.L., Babichev, S.A., Kryukov, A.O., Kiyarov, N.V., Ermolaev, A.I. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations]. N. Novgorod: Vector TiS, 2010, vol. 1. 570 p.

2. Babichev, S.A., Bychkov, E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol. 81, pp. 489–492.

3. Zyuzev, A.M., Metel'kov, V.P., Mikhailchenko, S.G. *Otsenka teplovogo sostoyaniya elektrodvigatelay peremennogo toka na KS MG* [Assessment of the thermal state of AC electric motors at the gas compressor station]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 88–96.

4. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E. *Metodologiya i sredstva operativnogo monitoringa elektrodvigatelay na KS* [Methodology and means of operational monitoring of electric motors at the gas compressor station]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2019, no. 11, pp. 52–58.

5. Stepanov, S.E., Bychkov, E.V. *Opyt primeneniya chastotno-reguliruemogo privoda ventilyatorov apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya gaza* [Experience in using a variable-frequency drive for fans of air-cooled gas cooling devices]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii AEP-2016* [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) conference AEP-2016]. Perm', 2016, pp. 428–432.

6. Vasenin, A.B. *Energoeffektivnye i ekologichnye ustanovki vozdušnogo okhlazhdeniya* [Energy-efficient and environmentally friendly air-cooling units]. *Trudy XIX Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki 2017»: v 3 t.* [Proceedings of the scientific congress of the 19th International Scientific and Industrial Forum “Great Rivers 2017”. In 3 vol.]. Nizhny Novgorod: NGASU, 2017, pp. 93–96.

7. Puzhaylo, A.F., Spiridovich, E.A., Voronkov, V.I. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations: monograph]. N. Novgorod: Vector TiS, 2011, vol. 2. 664 p.

8. Kryukov, O.V. *Monitoring usloviy ekspluatatsii elektrodvigatelay gazoperekachivayushchikh agregatov* [Monitoring the operating conditions of electric motors of gas pumping units]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 50–58.

9. Kiyarov, N.V. *Reshenie zadach promyshlennoy ekologii sredstvami elektrooborudovaniya i ASUT* [Solving industrial ecology problems by means of electrical equipment and automated process control systems]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2009, no. 4, pp. 29–34.

10. Repin, D.G. *Sistemy operativnogo monitoringa sostoyaniya energoustanovok dlya energeticheskoy*

bezopasnosti KS [Systems for operational monitoring of power plant conditions for compressor station energy safety]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2014, no. S(712), pp. 84–90.

11. Kryukov, O.V. *Energoeffektivnye elektropriivody GPA na baze intellektual'nykh sistem upravleniya i monitoringa*. Diss. ... d-ra tekhn. nauk [Energy-efficient electric drives of gas pumping units based on intelligent control and monitoring systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow: AO «Korporatsiya VNIIEМ», 2015.

12. Kryukov, O.V. Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 56–62.

13. Gulyaev, I.V., Stepanov, S.E., Vasenin, A.B. Razrabotka prikladnogo programmnogo obespecheniya dlya sistem geotekhnicheskogo monitoringa gazoprovodov [Development of application software for a geotechnical monitoring system for gas pipelines]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2022, vol. 25, no. 6(288), pp. 48–59.

14. Rubtsova, I.E., Stepanov, S.E. Neyronechetkie modeli i algoritmy upravleniya i monitoringa mashin bol'shoy moshchnosti [Neuro-fuzzy models and algorithms for control and monitoring of high-power machines]. *Materialy VI NTK «Upravlenie i informatsionnye tekhnologii» (UIT-2010) OAO «Kontsern TsNII “Elektropribor”»* [Materials of the 6th STC “Control and Information Technologies” (UIT-2010) of JSC “Concern Central Research Institute “Elektropribor”]. Saint-Petersburg, 2010, pp. 160–162.

15. Stepanov, S.E. Modernizatsiya sistem upravleniya EGPA v usloviyakh deystvuyushchikh KS [Modernization of EGPA control systems under operating CS conditions]. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh. MNTK* [Problems of automation and control in technical systems. MNTK]. Penza: Penzenskiy gosudarstvennyy universitet, 2013, pp. 29–32.

16. Kryukov, O.V. Opyt proektirovaniya ASU TP neftepererekachivayushchikh stantsiy magistral'nykh nefteprovodov [Experience in designing automated process control systems for oil pumping stations of main oil pipelines]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2017, no. 1, pp. 2–7.

17. Stepanov, S.E. Vybor metodov monitoringa i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomatizirovannykh elektropriivodov energeticheskikh ob'ektov [Selection of methods for monitoring and forecasting the technical condi-

tion of automated electric drives of power facilities]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 11, pp. 32–39.

18. Babichev, S.A., Zakharov, P.A. Avtomatizirovannaya sistema operativnogo monitoringa privodnykh dvigateley [Automated system for operational monitoring of drive motors]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2009, no. 6, pp. 3–6.

19. Zakharov, P.A., Kiyanov, N.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya elektrodvigateley [Built-in system for diagnostics and forecasting of electric motors]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2008, no. 11, pp. 43–49.

20. Kryukov, O.V., Stepanov, S.E., Serebryakov, A.V. Sovremennyy podkhod k organizatsii remonta po dannym prognoza tekhnicheskogo sostoyaniya i resursa elektrooborudovaniya [Modern approach to organizing repairs based on forecast data for the technical condition and resource of electrical equipment]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2017, no. 8(756), pp. 84–89.

21. Repin, D.G. Kontsepty sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya kompressornykh stantsiy [Concepts of systems for monitoring the technical condition of compressor stations]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 30–35.

22. Voronkov, V.I., Rubtsova, I.E. Osnovnye ekologicheskie napravleniya i zadachi energosberezheniya pri proektirovanii ob'ektov OAO «Gazprom» [The main environmental directions and tasks of energy saving in the design of Gazprom OJSC facilities]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2013, no. 7(693), pp. 74–78.

23. Makridenko, L.A., Volkov, S.N., Sarychev, A.P., Kobel'kov, N.O. *Monitoring i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskikh sistem energetiki* [Monitoring and forecasting the technical condition of electromechanical power systems]. Moscow: JSC VNIIEМ, 2017.

24. Zakharov, P.A., Kiyanov, N.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya elektropriivodnykh GPA [Built-in diagnostics and forecasting system for electric-driven GPA]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2008, no. 11, pp. 43–49.

25. Gulyaev, I.V., Teplukhov, D.Yu. Bayesovskie modeli prinyatiya resheniy pri tekhnicheskoy obsluzhivani AEP [Bayesian models of decision making in maintenance of AEP]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2022, no. 3, pp. 49–55.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 4

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 1.08.2025. Выход в свет 31.08.2025. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 10,58. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8