

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПАРАМЕТРАМИ ГЕНЕРИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

УДК
665.7.0.038.5

RESEARCH OF CORRELATION OF OPERATING MODES AND CHARACTERISTIC DAMAGES OF THE PUMP-COMPRESSOR EQUIPMENT WITH PARAMETRES GENERATED BY THE ENGINE OF AN ELECTRIC DRIVE OF THE HIGHER HARMONIOUS MAKING CURRENTS AND VOLTAGES

**И.В. Прахов, М.Г. Баширов,
А.В. Самородов**
ГОУ ВПО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет

**I.V. Prakhov, M.G. Bashirov,
A.V. Samorodov**
Ufa State Petroleum Technical
University

В работе приведены результаты экспериментальных исследований взаимосвязи режимов работы и характерных повреждений насосно-компрессорного оборудования взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектов с параметрами высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателями электропривода.

In work results of experimental researches of correlation of operating modes and characteristic damages of the pump-compressor equipment the shot-fire dangerous and chemically dangerous industrial plants with parametres of the higher harmonious making currents and the voltages generated by engines of the electric drive are reduced.

Ключевые слова: насосно-компрессорное оборудование, электрический привод, коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения, угол сдвига по фазе, повреждения, режим работы, техническое состояние.

Keywords: the pump-compressor equipment, an electric drive, factors of harmonious components of a current and voltage, a corner of a phase lag, damage, an operating mode, a technical condition.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований взаимосвязи режимов работы и характерных повреждений насосно-компрессорного оборудования взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектов с параметрами высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателями электропривода.

Состояние промышленной безопасности на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах во многом определяется техническим состоянием насосно-компрессорного оборудования. Ввиду высокой опасности обращающихся в технологических циклах предприятий химических веществ, отказ насосно-компрессорного оборудования может привести к созданию аварийных ситуаций, сопровождается значительным экономическим и экологическим ущербом.

Двигатели электропривода при определенных режимах работы, возникновении и развитии повреждений отдельных элементов электрической и меха-

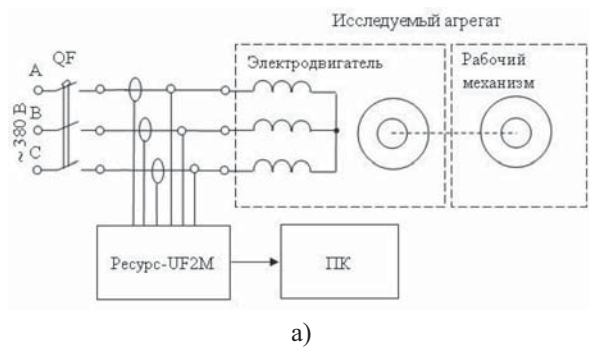
нической части насосно-компрессорного оборудования генерируют характерный спектр высших гармонических составляющих токов и напряжений. Выявление корреляционной связи между режимами работы насосно-компрессорного оборудования, характерными повреждениями элементов электрической и механической части и параметрами генерируемых двигателем электропривода высших гармонических составляющих токов и напряжений позволит решить задачу мониторинга технического состояния и прогнозирования ресурса этого оборудования [1, 2, 3].

Экспериментальные исследования насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом проводились в реальных производственных условиях технологических установок и распределительных подстанций ОАО «Салаватнефтеоргсинтез», а также в научно-исследовательских лабораториях Филиала ГОУ ВПО УГНТУ в г. Салавате. В качестве объектов исследования были выбраны центробежные насосы с асинхронными электродвигателями, указанные в таблице 1. Структурная схема и внешний вид экспериментальной установки представлены на рисунке 1.

Структурные и принципиальные электрические схемы экспериментальных установок разработаны в соответствии с [4] и [5]. Методики проведения экспериментальных исследований и обработки результатов разработаны в соответствии с [6], [7], [8], [9], [10], [11], руководствами по эксплуатации средств измерений и инструкциями по обслуживанию и эксплуатации машинных агрегатов.

Таблица 1. Технические характеристики исследуемых насосов

№ п/п	Тип насоса	Мощность на валу насоса, кВт	Число оборотов, об/мин	Тип электродвигателя
1	ЗГр-8	5,5	1450	А 81-4
2	К80-50-200	10,5	2900	4АМ160S2
3	2Х-4Х2И-21	17	2900	АИМ100L2У2,5
4	1П12,5/12,5	3,0	1450	АИР100S4



а) структурная схема; б) внешний вид
Рисунок 1. Экспериментальная установка для исследования центробежных насосов с электроприводом

Для оценки степени искажения формы кривых токов и напряжений определенными гармоническими составляющими использовались коэффициенты n -ых гармонических составляющих тока K_{In} и напряжения K_{Un} и углы сдвига по фазе $\varphi_{ui(n)}$ между соответствующими гармоническими составляющими фазных токов $I_{(n)}$ и напряжений $U_{(n)}$. Измерение коэффициентов n -ых гармонических составляющих токов K_{In} и напряжений K_{Un} и углов $\varphi_{ui(n)}$ осуществлялось измерителем показателей качества электроэнергии Ресурс-UF2М. Состояние подшипников качения контролировалось с помощью индикатора дефектов подшипников ИДП-03. Состояние изоляции и проводников элементов системы электропривода контролировалось с помощью микропроцессорного прибора 2801 IN производства компании «Standard Electric Works» (США) и индикатора дефектов обмоток ИДО-05. Анализ результатов измерений осуществлялось с помощью

переносного персонального компьютера со специализированным программным обеспечением [7].

Метрологическое обеспечение результатов экспериментальных измерений осуществлялось согласно [6, 2, 3] и паспорта измерителя показателей качества электроэнергии Ресурс-UF2М. Коэффициенты n -ых гармонических составляющих токов и напряжения измерялись в процентах от значения первой гармоники тока и напряжения. Пределы абсолютной погрешности измеряемых величин указаны в таблице 2.

Таблица 2. Пределы абсолютной погрешности измеряемых величин

Наименование измеряемой величины	Диапазон измерений	Предел абсолютной погрешности
Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения K_{Un} , %	0,05 – 30	$\pm (0,03 + 0,02 K_{Un})$
Коэффициент n -ой гармонической составляющей тока K_{In} , %	0,05 – 100	$\pm (0,03 + 0,02 K_{In})$
Угол фазового сдвига между n -ыми гармоническими составляющими тока и напряжения $\varphi_{ui(n)}$	$-180^\circ - +180^\circ$	$\pm (2 \div 10)^\circ$

Были исследованы следующие характерные повреждения рабочих механизмов и электродвигателей агрегатов: ухудшение состояния изоляции обмоток, изменение сопротивления проводов обмоток, дисбаланс ротора электродвигателя и вала машинного агрегата, неисправности подшипников, межвитковые короткие замыкания обмоток статора, межфазные короткие замыкания обмоток статора, однофазные замыкания фазы на корпус, обрыв фазы на выводах обмотки статора, обрыв стержней обмотки ротора, несоосность валов электродвигателя и машинного агрегата, эксцентриситет ротора, ослабление элементов крепления на фундаменте, дефект исполнительного органа машинного агрегата (рабочего колеса), кавитационный и помпажный режимы.

Режимы работы центробежного насоса изменяли открытием (закрытием) задвижек на всасе и нагнетании. Степень открытия (закрытия) задвижек на всасе и нагнетании составляла 0 %, 25 %, 50 %, 75 % и 100 % проходного сечения. Искусственно дисбаланс ротора двигателя и вала насоса создавался при помощи грузов, прикреплённых на ротор и вал. Сопротивление изоляции обмотки статора электродвигателя доводилось путем увлажнения до значения 0,4 МОм, а затем сушкой, с помощью нагревательного элемента, повышалось до значений 0,5 МОм, 1,0 МОм, 2,0 МОм, 5,0 МОм, 10,0 МОм, 50,0 МОм. Повреждения обмоток ротора электродвигателя соз-

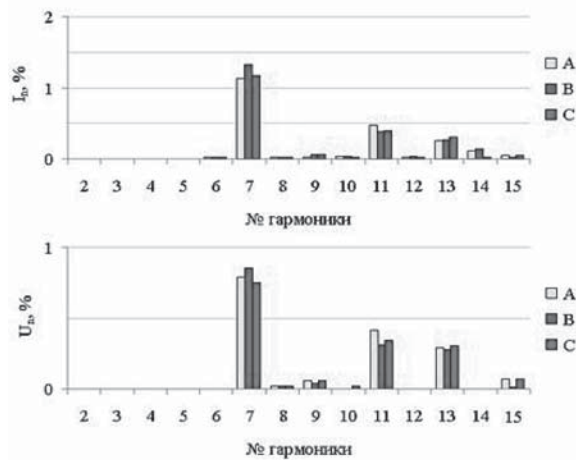
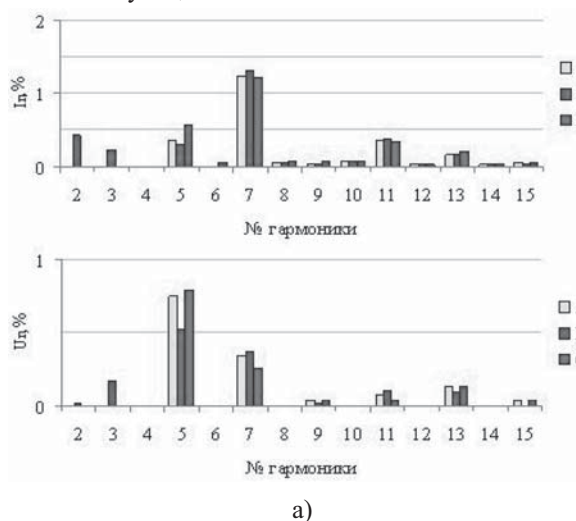


Рисунок 2. Гармонический состав токов и напряжений электродвигателя центробежного насоса в исправном состоянии

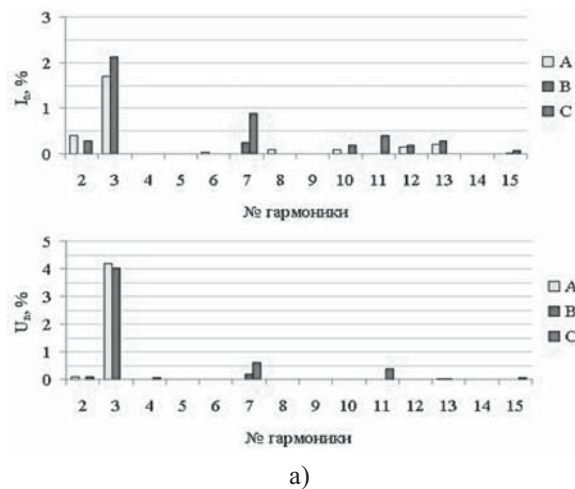
давались путем высверливания стержней обмотки ротора на 25%, 50% и 100% площади поперечного сечения. Плохое крепление к фундаменту создавалось путем ослабления болтов крепления. Повреждения подшипников электродвигателя и насоса имитировалось установкой подшипников с разной степенью изношенности. Искусственные замыкания между различными витками (фазами) в фазных обмотках и однофазные замыкания создавались при помощи специальных выводов. Для имитации переходного сопротивления изоляции в точке замыкания, эти выводы соединялись через регулируемое активное сопротивление (реостат), что позволило получать различные степени тяжести исследуемых повреждений. Повреждения рабочего колеса насоса имитировалось установкой рабочих колес с разной степенью изношенности. Обрыв фаз обмоток статора электродвигателя осуществлялось путем отсоединения выводов соответствующих обмоток.



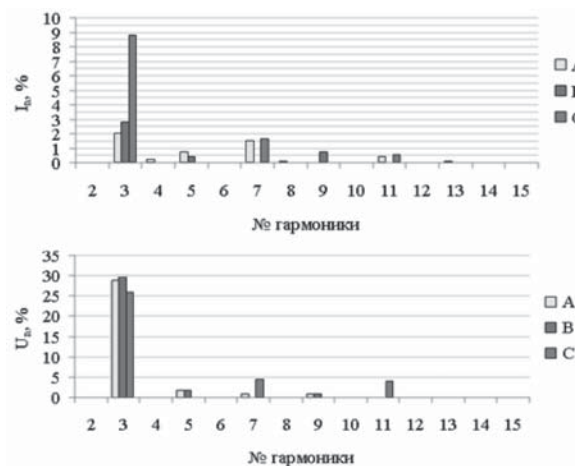
а)

а) при повреждении рабочего колеса; б) при неисправности подшипника со стороны рабочего колеса на насосе

Рисунок 4. Гармонический состав токов и напряжений электродвигателя центробежного насоса при неисправностях элементов механической части



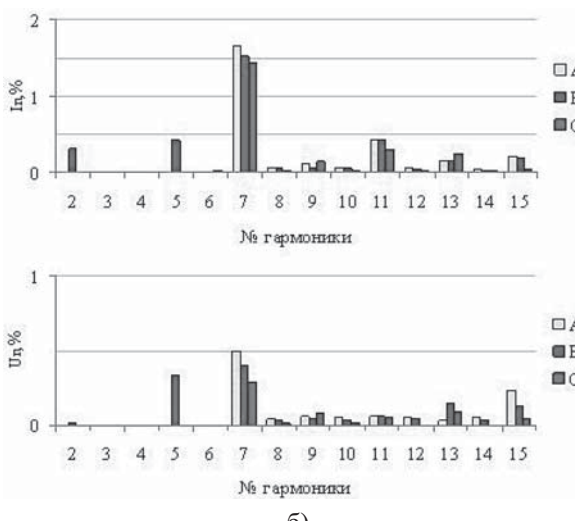
а)



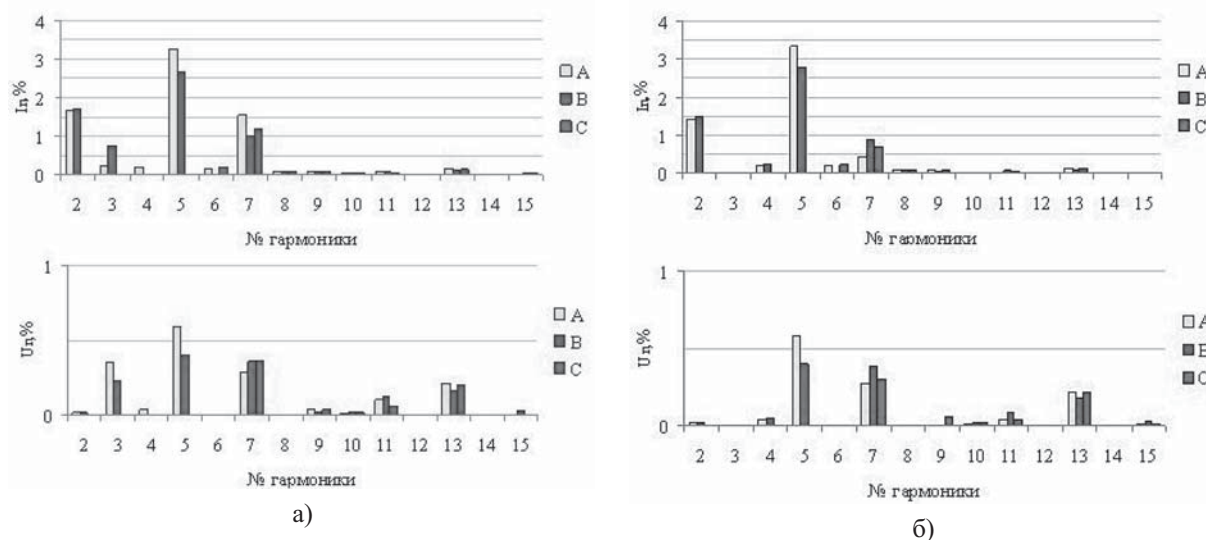
б)

а) при витковом замыкании в фазе С обмотки статора; б) при межфазном замыкании фаз А и В в обмотке статора

Рисунок 3. Гармонический состав токов и напряжений электродвигателя центробежного насоса при неисправностях элементов электрической части



б)



а) при возникновении помпажа; б) при возникновении кавитационного режима работы насоса
Рисунок 5. Гармонический состав токов и напряжений электродвигателя центробежного насоса при различных режимах работы

Для отделения гармонических составляющих фазных токов и напряжений, поступающих из сети, от гармонических составляющих, генерируемых двигателем электропривода, использовались углы сдвига по фазе $\varphi_{u(k)}$ между соответствующими гармоническими составляющими фазных токов $I_{(n)}$ и напряжений $U_{(n)}$. Углы сдвига меньше ($+90^\circ$) и больше (-90°) соответствуют гармоническим составляющим, поступающим из сети, которые из последующего анализа исключались [8].

Магнитодвижущая сила (МДС) каждой отдельной фазы обмотки статора представляет собой сумму неподвижных в пространстве и пульсирующих во времени всех гармонических составляющих, результирующая МДС машины для каждой гармонической составляющей в отдельности является суммой соответствующих гармонических составляющих всех трех фаз [15, 16]. На рисунке 2 представлен гармонический состав токов и напряжений электродвигателя центробежного насоса в исправном состоянии.

При возникновении электрических неисправностей (ухудшение состояния изоляции, изменения сопротивления проводов обмоток, витковые замыкания и т.д.) нарушаются электрическая и магнитная симметрии обмоток статора и ротора и, как следствие этого, определенным образом нарушается симметрия МДС третьей гармоники в фазных обмотках (рисунок 3 а, б).

При возникновении механических неисправностей (при дисбалансе, при повреждениях подшипников и т.д.), а также при различных ненормальных режимах работы (помпаж, кавитационный режим), в статорной обмотке протекают токи, вызванные напряжением сети, и токи, вызванные напряжением, индук-

тированным обратным полем ротора. Так как частоты этих токов отличаются друг от друга незначительно, следовательно в результате сложения их магнитных полей возникает пульсация (биение) малой частоты фазного тока и его гармонических составляющих. При повреждениях ротора электродвигателя и вала насоса (дисбаланс, повреждения подшипников) пульсация (биение) малой частоты фазного тока и его гармонических составляющих (в основном пятой и седьмой) увеличивается (рисунок 4).

На рисунке 5 представлен гармонический состав токов и напряжений электродвигателя центробежного насоса при возникновении помпажа и кавитационного режима работы насоса.

Техническому состоянию и режиму работы насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом соответствует совокупность гармонических составляющих токов и напряжений с определенными параметрами – Фурье-образ агрегата.

Вывод

Результаты экспериментальных исследований показывают, что двигатели электропривода при определенных режимах работы, возникновении и развитии повреждений отдельных элементов электрической и механической части насосно-компрессорного оборудования генерируют характерный спектр гармонических составляющих токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей. Наиболее информативными являются параметры третьей, пятой и седьмой гармоник токов и напряжений. Однако четкой закономерности характера изменения коэффициентов n -ых

гармонических составляющих тока K_{in} и напряжения K_{Un} и углов сдвига по фазе $\varphi_{u(n)}$ между соответствующими гармоническими составляющими фазных токов $I_{(n)}$ и напряжений $U_{(n)}$ при развитии различных повреждений проследить трудно. Для выявления функциональной зависимости между параметрами гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем электропри-

вода, и техническим состоянием и режимами работы насосно-компрессорного оборудования целесообразно использовать теорию планирования эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

Баширов М.Г., Прахов И.В. Исследование влияния неисправностей элементов насосно-компрессорного оборудования на параметры генерируемых двигателем электропривода высших гармонических составляющих токов и напряжений // Материалы Всероссийского консультационно-методического семинара «Повышение надежности и безопасности трубчатых печей нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств». - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. - С. 114-119.

2. Баширов М.Г., Прахов И.В. Исследование взаимосвязи параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем, с характерными повреждениями электропривода // Материалы Всероссийской научно – технической конференции «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий». - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – Том 2. – С. 84-86.

3. Баширов М.Г., Шикинов В.Н. Диагностика электрических сетей и электрооборудования промышленных предприятий: Учеб. пособие для вузов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. 220 с.

4. Межотраслевыми правилами по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок (с изм. и доп.) (ПОТ Р М-016-2001, РД 153-34.0-03.150-00). М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 192 с.

5. Правилами устройства электроустановок. Издание седьмое. М.: Юрайт-Издат, 2007. 399 с.

6. Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей. Утверждены Приказом Минэнерго РФ от

13.01.2003 № 6. Екатеринбург: Уралуриздат, 2003. 304 с.

7. ГОСТ 13109 – 97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: 1999. 32 с. (Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации).

8. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. РД 153-34.0-15.502-2002. М.: 2002. 32с.

9. ГОСТ 11828 – 86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. М.: 1986. 32 с. (Межгосударственный стандарт)

10. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. М.: Высшая школа, 2000. 255 с.

11. Объем и нормы испытаний электрооборудования РД 34.45-51.300-97. Шестое издание, с изм. и доп. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2004. 86 с.

12. ГОСТ 14014 – 91. Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. М.: 2002. 12 с. (ИПК Издательство стандартов).

13. ГОСТ 22261 – 94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. Минск: 1995. 32 с. (Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации).

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2009615000. Диагностика машинных агрегатов с электрическим приводом на основе анализа параметров генерируемых высших гармонических составляющих токов и напряжений / Кузеев И.Р., Баширов М.Г., Прахов И.В., Имамудинов Э.И. (Россия). – № 2009615000; Заявлено 16.06.2009 № 2009613824; Опубл. 14.09.2009.

15. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2002. 607 с.

16. Кацман М.М. Электрические машины и трансформаторы. М.: Высшая школа, 1976. – Ч. 2. 184 с.

И.В. Прахов, аспирант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал УГНТУ в г.Салават

I.V. Prakhov, postgraduate student of chair «Electric equipment and automatics of the industrial enterprises», branch USPTU in Salavat

М.Г. Баширов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал УГНТУ в г.Салават
M.G. Bashirov, dr.tech.sci., professor chief of chair «Electric equipment and automatics of the industrial enterprises», branch USPTU in Salavat

А.В. Самородов, аспирант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал УГНТУ в г.Салават
A.V. Samorodov, postgraduate student of chair «Electric equipment and automatics of the industrial enterprises», branch of USPTU in Salavat
e-mai: priwan@yandex.ru