

УДК 004.89:621.6.052

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

¹Прахов И.В., ¹Самородов А.В., ²Баширов М.Г.¹ООО «Газпром нефтехим Салават», Салават, e-mail: priwan@yandex.ru;²Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Салават, e-mail: priwan@yandex.ru

На безопасность технологических процессов предприятий нефтегазовой и нефтехимической отраслей существенное влияние оказывает техническое состояние насосных агрегатов. Использование насосного оборудования, работающего с взрывопожароопасными и токсичными средами при избыточном давлении и высоких температурах, срок эксплуатации которого значительно превышает нормативный, потенциально опасно и увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций. При этом аварии могут приводить к человеческим жертвам, отравлениям, загрязнению окружающей среды и большим экономическим потерям. Разработанная интеллектуальная система диагностики насосных агрегатов основана на анализе гармонического состава токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода. Интеллектуальная система диагностики позволяет определить техническое состояние насосного агрегата, производить диагностирование работающего оборудования, а также вести удаленный контроль и предоставляет рекомендации для дальнейшей безопасной эксплуатации насосного оборудования за пределами нормативного срока.

Ключевые слова: насосный агрегат, нейронная сеть, спектральный метод, обучение, повреждение, режим работы, планирование эксперимента, гармоники, электропривод, техническое состояние

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF PUMPING UNITS WITH ELECTRIC DRIVE

¹Prakhov I.V., ¹Samorodov A.V., ²Bashirov M.G.¹JSC «Gazprom Neftekhim Salavat», Salavat, e-mail: priwan@yandex.ru;¹Salavat Branch of Ufa State Petroleum Technical University, Salavat, e-mail: priwan@yandex.ru

The safety of the technological processes of the oil and gas and petrochemical industries is significantly influenced by the technical condition of the pumping units. The use of pumping equipment operating with explosive and toxic environments at excess pressure and high temperatures, the operating life of which is much higher than the normative, potentially dangerous and increases the likelihood of emergencies. In this case, accidents can lead to human casualties, poisoning, environmental pollution and large economic losses. The developed intelligent system for diagnosing pumping units is based on an analysis of the harmonic composition of the currents and voltages generated by the motor of the electric drive. The intelligent diagnostic system allows you to determine the technical condition of the pump unit, allows you to diagnose operating equipment, as well as to conduct remote monitoring and provide recommendations for the further safe operation of pumping equipment beyond the regulatory deadline.

Keywords: the pump unit, a neural network, a spectral method, training, damage, an operating mode, planning of experiment, a harmonic, electric drive, technical condition

При длительной эксплуатации насосного оборудования нефтегазовых и нефтехимических производств неизбежно возникают повреждения его элементов. Это вызвано особенностями нефтегазовых и нефтехимических производств (высокое давление, высокая температура, высокая степень коррозии и т.д.). К вопросам решения проблем безопасной эксплуатации насосного оборудования, выработавшего свой срок службы, относится применение систем (методов), которые предназначены для определения остаточного ресурса [1]. Эксплуатация насосного оборудования сверх нормативного срока допустима при наличии положительной информации о техническом состоянии. Отсутствие информации о техническом состоянии насосного оборудования позволяет осуществить эксплуатацию по наработке на отказ или плановое обслуживание в соответствии с нормативами

планово-предупредительных ремонтов [2]. Практика показала, что такая эксплуатация насосного оборудования приводит к увеличению средств на их техническое обслуживание и ремонт [3].

Для решения поставленной задачи разработана интеллектуальная система диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом, которая осуществляет идентификацию технического состояния и прогнозирование ресурса безаварийной работы насосного агрегата по совокупности параметров высших гармоник напряжений и токов, генерируемых электроприводом и на основе применения искусственной нейронной сети [4].

Программно-аппаратный комплекс интеллектуальной системы диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом состоит из измерителя ПКЭ Ресурс-UF2(M), компьютера и специального про-

граммного обеспечения [5]. Предусмотрена возможность подключения разработанного программно-аппаратного комплекса к существующей SCADA-системе предприятия (Supervisory Control And Data Acquisition) через OPC-сервер (OLE for Process Control). Структурная схема аппаратной части интеллектуальной системы диагностики представлена на рис. 1. На рис. 2 показан внешний вид программно-аппаратного комплекса. На рис. 3 представлен алгоритм определения уровня поврежденности насосных агрегатов.

С помощью интеллектуальной системы диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом можно определить следующие повреждения: неисправности подшипников, дисбаланс ротора электродвигателя и вала насосного агрегата, дефекты рабочего колеса насосного агрегата, эксцентриситет ротора, межфазные и межвитковые короткие замыкания обмоток статора электродвигателя, несоосность валов исполнительного органа и электродвигателя, ослабление элементов крепления на фундаменте, обрыв короткозамкнутых стержней обмотки ротора электродвигателя, обрывы фаз в питающем кабеле, ухуд-

шение состояния изоляции обмоток электродвигателя, однофазные замыкания фаз электродвигателя на корпус [6].

Основным достоинством интеллектуальной системы диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом является то, что она позволяет осуществлять удаленный контроль и производить диагностирование на работающем оборудовании. Определение дефектов на работающем насосном агрегате в начальный период времени их развития не только предотвращает неожиданную остановку технологического процесса в результате аварии, но и существенно увеличивает срок его эксплуатации и уменьшает затраты на ремонт оборудования [7].

В программно-аппаратном комплексе интеллектуальной системы диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом для прогнозирования ресурса и идентификации технического состояния применяются параметры первых десяти гармоник напряжений и токов: значения коэффициентов гармонических составляющих напряжений K_{Un} и токов K_{In} и значения углов сдвига по фазе $\varphi_{ui(n)}$ между напряжением и током рассматриваемыми гармониками [8].

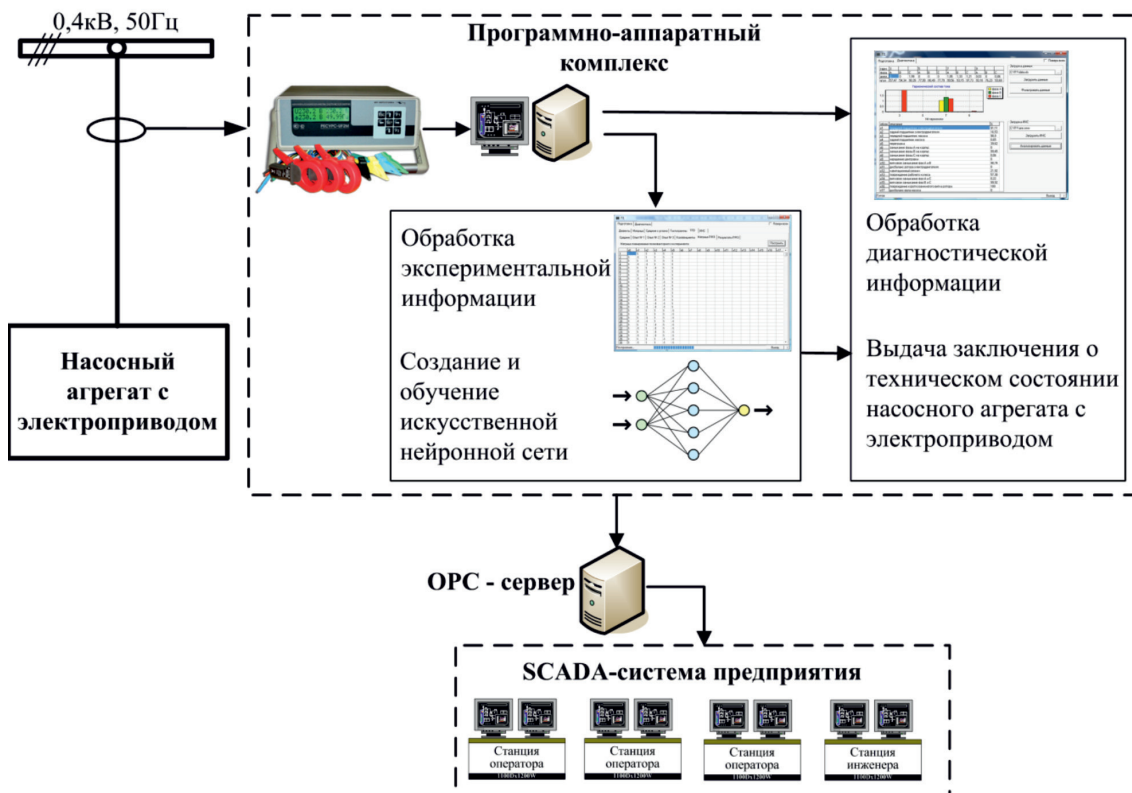


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса интеллектуальной системы диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом

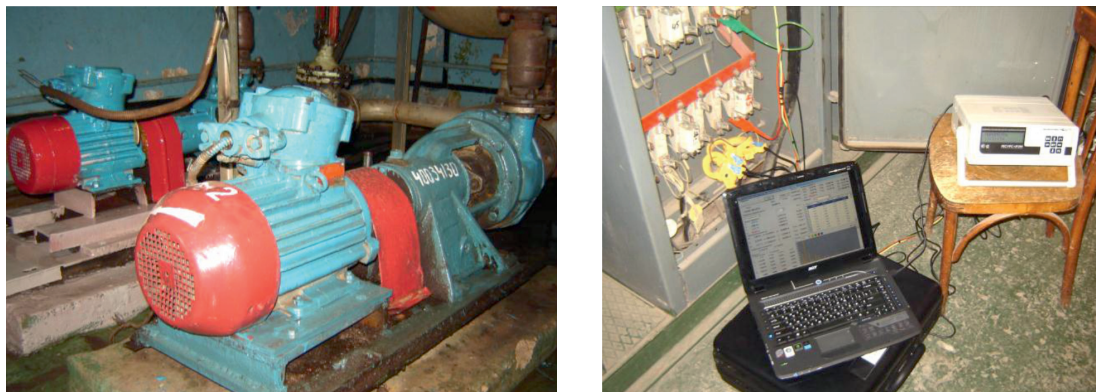


Рис. 2. Применение программно-аппаратного комплекса при диагностировании насоса K80-50-200

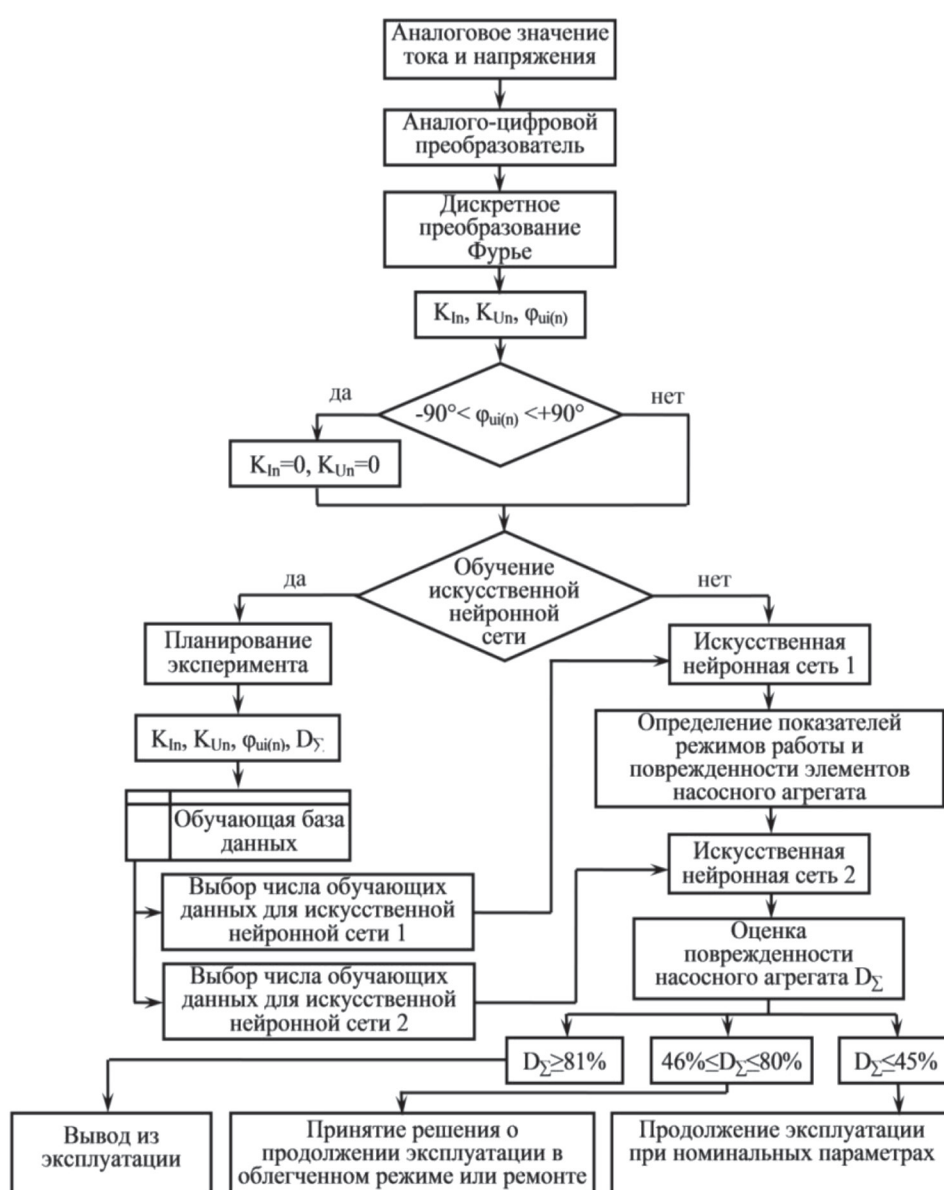


Рис. 3. Алгоритм определения уровня повреждения насосных агрегатов

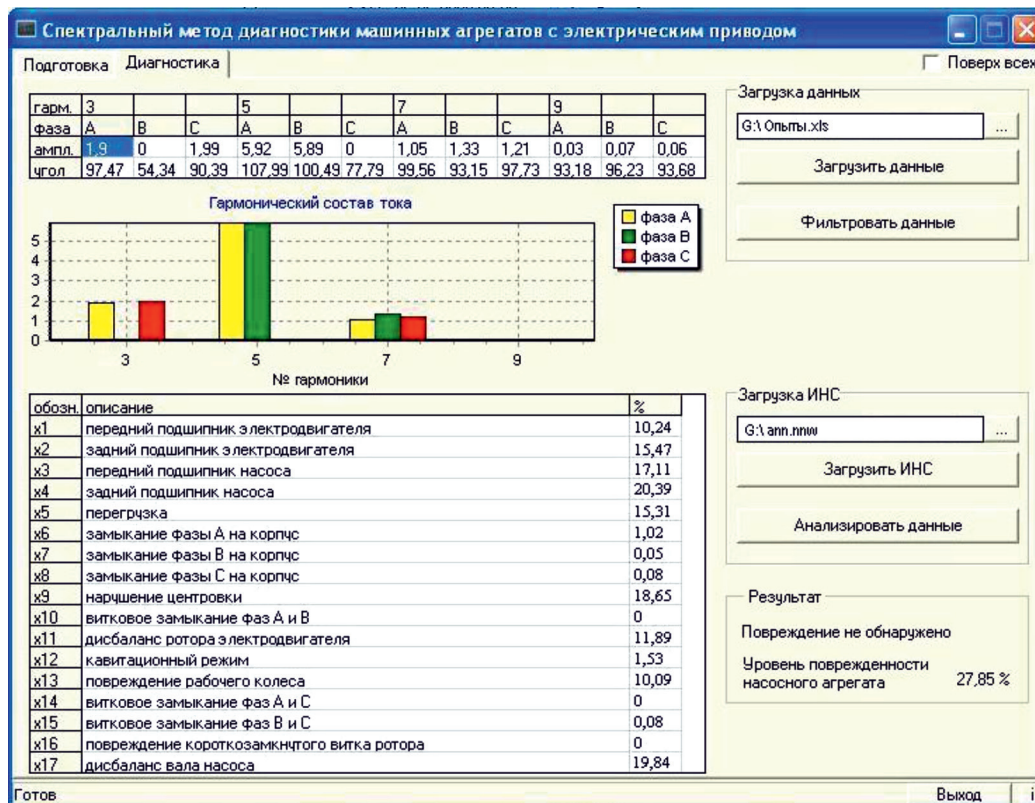


Рис. 4. Окно программы с результатом диагностирования интеллектуальной системой диагностики насосного агрегата с электрическим приводом К80-50-200

В интеллектуальной системе диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом метод планирования эксперимента используется для обучения нейронной сети. Метод планирования эксперимента позволяет создать базу данных для обучения нейронной сети и значительно уменьшить количество обучающих опытов [9].

Нейронная сеть 1 анализирует совокупность диагностических параметров и на выходе выводит значение поврежденности элементов насосного агрегата D_m [10]:

$$D_m = f(K_{in}, K_{un}, \varphi_{ui(n)}) = f(w_{11} K_{11} + w_{12} K_{12} + w_{13} K_{13} + \dots + w_{110} K_{110} + w_{U1} K_{U1} + w_{U2} K_{U2} + w_{U3} K_{U3} + \dots + w_{U10} K_{U10} + w_{\varphi 1} \varphi_{ui(1)} + w_{\varphi 2} \varphi_{ui(2)} + w_{\varphi 3} \varphi_{ui(3)} + \dots + w_{\varphi 10} \varphi_{ui(10)}), \quad (1)$$

где w – весовые коэффициенты диагностических параметров нейронной сети.

Нейронная сеть 2 анализирует значения поврежденности элементов насосного агрегата D_m и выдает результат – значение интегрального параметра поврежденности D_Σ , который показывает уровень поврежденности всего насосного агрегата [10]:

$$D_\Sigma = F\left(\sum_{m=1}^{17} w_m D_m\right), \quad (2)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots, 17$ – количество входов нейронной сети 2.

Углы сдвига по фазе $\varphi_{ui(n)}$ между напряжением и током рассматриваемыми гармониками используются для фильтрации гармонических составляющих напряжений и токов, приходящих из сети [11].

Для определения параметров гармоник напряжений и токов применяют прямоугольное измерительное окно T_ω . Для точного анализа параметров гармоник напряжений и токов в программно-аппаратном комплексе интеллектуальной системы диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом применяют измерительное окно T_ω от 0,02 с до 1 с на период частоты от 1 Гц до 500 Гц [12].

Для разложения напряжений и токов, потребляемых электроприводом на гармонические составляющие применяют методы быстрого и дискретного преобразования Фурье. Дискретное преобразование Фурье используют к действительному сигналу в пределах назначенного временного окна:

сигнал не обрабатывается, если он появился вне зоны этого временного окна. Таким образом, действительный сигнал заменяют искусственным сигналом, который является периодическим, с периодом, равным ширине назначенного временного окна [12].

Для исследования изменения малых значений гармонических составляющих напряжений и токов (например, при значениях токов близких к режиму холостого хода электродвигателей), для обнаружения зарождающихся дефектов необходимо использовать высокую разрядность аналого-цифрового преобразователя. Для того чтобы обеспечить необходимую чувствительность к изменениям параметров гармонических составляющих напряжений и токов, применяют аналого-цифровой преобразователь с разрядностью не ниже 16 [12].

Программно-аппаратный комплекс интеллектуальной системы диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом был испытан в реальных производственных условиях. Использовались насосные агрегаты К80-50-200, предназначенные для циркуляции воды в реакторе. На рис. 4 изображено окно программы с результатом диагностирования интеллектуальной системой диагностики насосного агрегата с электрическим приводом К80-50-200.

В первом столбце окна программы показано обозначение переменного воздействия повреждения. Во втором столбце показано текстовое описание фактора (повреждения). В третьем столбце показано значение поврежденности элементов насосного агрегата D_m в процентной шкале. В правой нижней части окна программы интеллектуальной системы диагностики насосного агрегата с электрическим приводом показан уровень поврежденности всего насосного агрегата в процентной шкале.

В разработанной интеллектуальной системе диагностики насосных агрегатов с электрическим приводом установлены три уровня поврежденности насосных агрегатов: «Повреждение не обнаружено», «Повреждение обнаружено», «Обнаружено критическое повреждение». «Повреждение не обнаружено» соответствует уровню интегрального диагностического параметра поврежденности в промежутке $0 \div 45\%$, «Повреждение обнаружено» – в промежутке $46 \div 80\%$, «Обнаружено критическое повреждение» – в промежутке $81 \div 100\%$ [12].

По результатам диагностирования с использованием разработанной интеллектуальной системы диагностики насосного агрегата с электрическим приводом К80-50-200 (см. рис. 4) интегральный параметр поврежденности D_{Σ} равен $27,85\%$ – «По-

вреждение не обнаружено», выдается рекомендация о продолжении эксплуатации. Результаты диагностирования исследуемых насосных агрегатов с использованием разработанной интеллектуальной системы диагностики совпали с результатами диагностирования этих агрегатов с применением прибора вибрационной диагностики.

Список литературы

1. Хисматуллин А.С. Мониторинг и ремонт промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию / А.С. Хисматуллин, А.Х. Вахитов, А.А. Феоктистов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 4–2. – С. 271–274.
2. Хисматуллин А.С. Методика технического обслуживания и ремонта промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию / А.С. Хисматуллин, А.Х. Вахитов, А.А. Феоктистов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2–2. – С. 308–313.
3. Вахитов А.Х., Хисматуллин А.С. Применение диагностического контроля электрооборудования для электроснабжения // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля-2016: материалы междунар. науч.-метод. конф., посвященной 60-летию филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате. – Уфа: Из-во УГНТУ, 2016. – С. 347–349.
4. Прахов И.В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – С. 165.
5. Миронова И.С. Разработка интегральных критериев и системы управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации машинных агрегатов: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2013. – С. 124.
6. Миронова И.С., Хуснудинова И.Г., Чурагулов Д.Г. Разработка программно-аппаратного комплекса для оценки энергоэффективности и ресурса безопасной эксплуатации машинных агрегатов с электрическим приводом // Федоровские чтения – 2014: материалы XLIV междунар. науч.-практ. конф. – М.: Из-во «Издательский дом МЭИ», 2014. – С. 129–131.
7. Баширова Э.М., Миронова И.С., Устинов А.Е., Юмагузин У.Ф. Оценка технического состояния и ресурса оборудования предприятий нефтегазовой отрасли с использованием интегральных критериев // Наука. Технология. Производство-2013: тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Из-во УГНТУ, 2013. – С. 97–99.
8. Привалова В.М., Юмагузин Ю.Ф., Миронова И.С. Разработка интегральных критериев и системы управления техническим состоянием машинных агрегатов // Наука. Технология. Производство-2015: тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Из-во УГНТУ, 2015. – С. 84–86.
9. Прахов И.В. Повышение эффективности использования искусственных нейронных сетей в задачах диагностики насосно-компрессорного оборудования применением теории планирования эксперимента / И.В. Прахов, М.Г. Баширов, А.В. Самородов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – № 2. – С. 14–17.
10. Прахов И.В. Применение искусственных нейронных сетей в спектральном методе диагностики машинных агрегатов / И.В. Прахов, А.Г. Бикметов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 9–3. – С. 502–506.
11. Баширова Э.М., Миронова И.С., Спиридонов А.О., Хакимов А.Р. Разработка системы управления техническим состоянием машинных агрегатов // Наука. Технология. Производство-2014: тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Из-во УГНТУ, 2014. – С. 86–88.
12. Кузеев И.Р., Баширов М.Г., Прахов И.В., Баширова Э.М., Самородов А.В. Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом // Патент России № 2431152. 2011. Бюл. № 28.