УДК 004.891.3

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-20-25

С. В. Пахтусов

И. И. Евдакимов

М. В. Аврамов, кандидат технических наук

ООО «Газпром трансгаз Саратов», Саратов

П. Г. Антропов, кандидат технических наук

Н. М. Губин

О. Н. Долинина, кандидат технических наук, доцент

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ

Описано существующее состояние дел в области диагностики неисправностей газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях, показано, что используемое программное обеспечение своевременно диагностирует неисправности ГПА, но не определяет причины их появления и, следовательно, не повышает эффективность их устранения. В статье предложен способ решения проблемы диагностики причин неисправностей ГПА за счет внедрения экспертной системы GASDETECT, разработанной на основе экспертных и ретроспективных данных ООО «Газпром трансгаз Саратов», описана структура системы, приведены примеры нечетких правил, для принятия решения используется нечеткий алгоритм Мамдани.

Ключевые слова: неисправности газоперекачивающих агрегатов, экспертная система, нечеткая база знаний, правила вывода.

Введение

Организация надежной и бесперебойной транспортировки природного газа является основной целью ООО «Газпром трансгаз Саратов» (далее – общество) на протяжении всех лет существования. Решению этой задачи подчинен весь комплекс организационных, проектно-конструкторских, эксплуатационных и иных мероприятий, реализуемых в системе транспорта природного газа общества.

Актуальность данной тематики обусловлена еще и тем, что средний возраст половины парка ГПА общества свыше 40 лет, значительная часть ГПА выработала назначенный заводом-изготовителем ресурс, что может негативно сказаться на надежности функционирования системы в целом.

Бесперебойное обеспечение потребителей газом зависит от надежной и безопасной работы всех элементов газотранспортной системы общества. Одним из ключевых моментов обеспечения надежной, безопасной и эффективной работы оборудования КС является своевременное и качественное проведение комплекса организационно-технологических мероприятий, таких как технические диагностирование и обслуживание, а также ремонт различных уровней.

В системе газоснабжения общества уже давно разработаны и внедряются целые комплексы мероприятий, направленных на оценку реального технического состояния объектов и поддержания заданного уровня надежности, безопасности, экологической приемлемости и энергоэффективности. В частности, по основному оборудованию КС эти требования выполняются расширенной системой мониторинга технического состояния ГПА, разработкой и внедрением карт технического обслуживания, проведением технологических регламентов, соблюдением требований проведения ремонтов и обязательными испытаниями, а также многими иными мероприятиями. Следует отметить неуклонное совершенствование и обновление систем агрегатной автоматики и инте-

грации ее с системами параметрического контроля и управления [1–2].

Необходимо отметить, что, несмотря на выполнение существующих требований по унификации технологических схем, оборудования, правил технической эксплуатации, мероприятий по повышению энергоэффективности и др., условия функционирования оборудования компрессорных станций (далее – КС) могут существенно различаться как в силу территориально-климатических особенностей месторасположения, так и в силу характерных режимов работы, фактической изношенности технологического оборудования, квалификации эксплуатационного и ремонтного персонала, удаленности промплощадок от основных производственных баз и т. п.

На сегодняшний день ПАО «Газпром» уделяет особое внимание созданию принципиально новой концепции управления техническим состоянием и целостностью (далее – СУТСЦ) всех объектов единой системы газоснабжения (далее – ЕСГ). Главная цель – обеспечение требуемых надежности и безопасности эксплуатации объектов на основе адресного планирования управляющих воздействий и оптимального распределения финансовых затрат.

В наиболее общем случае, в отечественной системе транспорта и хранения природного газа в силу целого ряда причин складывается практика эксплуатации ГПА по фактическому техническому состоянию. Таким образом, первостепенной задачей обеспечения надежной и безопасной работы оборудования становится своевременное выявление неисправностей в работе агрегатов и их элементов и достоверное прогнозирование технического состояния и ситуационного развития событий. В свою очередь, достоверное прогнозирование позволяет скорректировать и индивидуализировать технологические карты ремонтов, уменьшить простои оборудования, оптимизировать логистические потоки запасных частей, загруженность ремонтного персонала и др.

В настоящее время, несмотря на очевидное продвижение в вопросах внедрения систем мониторинга и контроля технического состояния ГПА в реальных условиях эксплуатации, продолжают существовать и традиционные проблемы [3]. Системы агрегатной автоматики пока недостаточно точно и достоверно указывают первопричину отказа или возникшей аварийной ситуации. Чаще всего эксплуатационный персонал видит только результат – сработавшая защита, отклонение параметра, а реальная причина «срабатывания» остается неизвестной. Большое значение, таким образом, имеет человеческий фактор, опытность и дотошность эксплуатационного персонала, способность анализировать и выявлять потенциально опасные ситуации, обобщать накопленный опыт. В реальных условиях эксплуатации, в силу объективных причин, рассчитывать на безошибочность действий и принятие решений даже опытным персоналом сложно. Кроме того, целесообразно интегрировать механизмы прогнозирования технического состояния ГПА, да и любого технического объекта, с системой мониторинга, накопленными статистическими данными и опытом эксплуатации, чтобы снизить влияние человеческого фактора и, по возможности, исключить вероятность совершения ошибок. Автоматизация процесса получения наиболее информативных параметров и показателей функционирования ГПА, а также внедрения действенных методологий принятия решений эксплуатационным персоналом и прогнозирования развития ситуации могло бы стать существенным фактором повышения надежности работы основного оборудования КС [4].

Описание проблемы

Сложность объекта исследования не позволяет получить универсальное решение, что вызывает трудности при разработке алгоритмов диагностики неисправностей и требует сочетания различных методов и подходов.

Исследованию задач повышения надежности энергетического оборудования и трубопроводных систем в разное время были посвящены работы С. П. Зарицкого, В. А. Иванова, В. А. Острейковского, Е. А. Ларина, А. А. Семенова и др. Исследования по повышению эксплуатационной надежности ГПА проводились ООО «Газпром ВНИИГАЗ», РГУНиГ им. И. М. Губкина, ООО «Оргэнергогаз», ВНИИЭГазпром, ТюмГНГУ, СГТУ им. Гагарина Ю. А. и рядом других организаций.

Применение любых методов диагностики и прогнозирования к газоперекачивающим агрегатам подразумевает регулярный сбор данных о техническом состоянии как всей установки, так и отдельных ее компонентов. Используемое в настоящее время на компрессорных станциях общества программное обеспечение систем диагностики ГПА не позволяет сформировать математическую модель исправного агрегата на основе полученных во время эксплуатационных технических испытаний; рассчитать термодинамические параметры состояния проточных частей центробежного нагнетателя (ЦН) и газотур-

бинной установки (ГТУ) и спрогнозировать изменения их значений; отслеживать выход параметров из допустимого диапазона и формировать диагностические сообщения для оповещения; формировать рекомендации; накапливать и визуализировать результаты параметрической диагностики.

К недостаткам такого рода систем можно отнести отсутствие функционала выдачи консультаций по причинам возникающих отказов и методам их устранения. Таким образом, система не оказывает достаточной поддержки в принятии решения для обслуживающего персонала, что понижает степень достоверности определения причин возникновения неисправности и увеличивает время принятия решения в силу различного уровня экспертных знаний и опыта работы у эксплуатационного персонала. Кроме того, заложенный в ПО математический аппарат не отражает неуверенностей и неточностей, присущих утверждениям в данной предметной области.

Постановка задачи

В силу сложности и многокомпонентности объекта диагностирования задача выявления и предупреждения неисправностей не сводится только к контролю значений каждого параметра агрегата по отдельности. Выявление и предупреждение неисправностей установки может быть осуществлено только на основе анализа как системы в целом, так и ее структурных компонентов, также являющихся, в свою очередь, сложными системами. В частности, характерным признаком появления неисправности может являться не только критическое значение определенных параметров, но и динамика их изменения в рамках допускаемых технической документацией значений [5, 6].

Взаимосвязь изменения параметров, наличия неисправностей и причин их возникновения имеет сложный характер. Для моделирования такого рода зависимостей более всего подходят методы искусственного интеллекта (ИИ), позволяющие описывать причинно-следственные связи между данными как числовой, так и нечисловой природы. Также зависимости между параметрами могут иметь неявный характер, а система, оперирующая такими параметрами, должна предусматривать возможность неточностей и частичных неопределенностей в описании причинно-следственных связей, а также учитывать рекомендации экспертов, часто имеющие элемент неопределенности [7].

Кроме того, применение методов ИИ для диагностирования неисправностей ГПА позволяет выполнять основные требования к диагностике: точность, достоверность и быстродействие.

Под точностью будем понимать степень совпадения реального значения диагностируемого параметра и значения, вычисленного системой диагностики.

Под достоверностью будем понимать степень уверенности в истинности утверждения, выдаваемого системой диагностики (например, о наличии опре-

деленного вида неисправности или набора вызвавших ее причин). В случае интеллектуальных систем точность и достоверность достигаются за счет использования экспертных знаний, а также многократной перенастройки (обучения) системы на основе исходных и вновь поступающих экспериментальных данных.

Под быстрым действием будем понимать количество решений, даваемых системой за единицу времени. Выбор оптимального способа представления знаний в интеллектуальной системе, механизмов принятия решений и программно-аппаратной реализации позволяет удовлетворить требования к быстроте действия системы диагностики.

Таким образом, использование методов ИИ в разработке программного комплекса диагностики неисправностей ГПА позволит в необходимой степени удовлетворить основные требования к диагностике и создать расширяемую платформу для дальнейшей доработки и модификации.

Описание экспертной системы определения неисправностей газоперекачивающих агрегатов

Для решения проблемы диагностики неисправностей ГПА была разработана экспертная система (ЭС) GASDETECT, предназначенная для определения неисправностей на газоперекачивающих агрегатах типов ГПА-Ц1-16С, ГТ-750-6, ГПА-Ц-6.3. Среди функций системы – накопление и систематизация информации о произошедших авариях и инцидентах, поиск аналогичных ситуаций и определение причин, из-за которых произошли отказы.

ЭС GASDETECT состоит из следующих подсистем, схематично представленных на рис. 1:

- подсистема определения причины неисправностей;
- подсистема управления БЗ;
- подсистема управления БД хранения информации об авариях;
- подсистема поиска аналогов;
- подсистема взаимодействия с пользователем.

Рис. 1. Структурная схема подсистем ЭС GASDETECT

Подсистема взаимодействия с пользователем предназначена для обеспечения диалогового взаимодействия работающих на компрессорных станциях с экспертной системой. В рамках подсистемы производится разграничение прав доступа к функциям ЭС между оператором и инженером по знаниям. Основным функционалом, к которому имеет доступ эксперт, является подсистема управления базой знаний. Также имеется возможность вносить изменения в существующие и добавлять новые правила. Этот компонент обменивается данными из базы знаний через подсистему управления базой знаний. В модуле управления БЗ происходит чтение, запись файлов и загрузка данных в память экспертной системы.

Функция *подсистемы накопления управления знаний базой знаний (ППЗ)* состоит в программной поддержке процесса добавления и корректировки знаний о неисправностях, т. е. выполняет функцию обучения экспертной системы, а также управляет рабочими режимами чтения, записи файлов и загрузки данных в память экспертной системы.

Подсистема определения причины неисправностей позволяет на основе базы знаний определять

причину неисправностей ГПА в режиме консультации с экспертной системой.

Подсистема управления базой данных предназначена для накопления структурированной информации о произошедших инцидентах. Подсистема состоит из базы данных, хранящей информацию о фактах и программном обеспечении, манипулирующей данными между другими компонентами системы. База данных, реализованная на платформе MS SQL Server 2012, содержит классификацию возможных неисправностей, описание структурных элементов газоперекачивающих агрегатов, а также перечень неисправностей ГПА, диагностированных за десятилетний период наблюдений. Указанные данные представлены в группах таблиц базы данных: «Станции», «ГПА» и «Неисправности». К первой группе принадлежат таблицы, которые описывают рассматриваемые компрессорные станции и их технические характеристики. Группа «ГПА» описывает подробную информацию о конкретном узле, например выполненные технические осмотры и т. п. Группа «Неисправности» содержит данные о произошедших авариях.

Подсистема поиска аналогов позволяет на основе входной информации о произошедшем инциденте сформировать множество аналогичных или частично аварийных ситуаций, имевших место в прошлом, на основе ретроспективного анализа. Данная подсистема является удобным инструментом для быстрого определения причины неисправности, если похожий инцидент был раньше. Например, на ГПА произошло снижение давления масла смазки нагнетателя, по причине выхода из строя главного масляного насоса сработала аварийная сигнализация «Давление смазки нагнетателя < 0,8 кгс/см²», то система, используя многокритериальный поиск, выбирает подобную аварийную ситуацию, ее детальное описание, включая различные причины и перечень мероприятий для устранения неисправности, что может сократить время принятия решения в конкретной аварийной ситуации.

Описание базы знаний экспертной системы

Для данной задачи выбрана продукционная база знаний, содержащая нечеткие правила, определяемая совокупностью:

$$P = (F, R, G, I), \quad (1)$$

где F – множество фактов о решаемой проблеме; число фактов конечно; G – множество целей или терминальных фактов ЭС, которые определяют при-

чины неисправностей и способы их устранения; I – интерпретатор правил логического вывода; R – множество правил, имеющих вид:

$$r_i: s_j, pr_k, \text{ если } \langle t_n \rangle f_1 \text{ и } \langle t_n \rangle f_2 \dots \langle t_n \rangle f_i \text{ то } \langle t_n \rangle f_m, \quad (2)$$

где $r_i \in \{R\}$, $i = \overline{1, 648}$; $s_j \in \{S\}$ – множество групп причин неисправностей, $j = \overline{1, 5}$; $pr_k \in \{Pr\}$ – множество приоритетов правил $k = \overline{1, 100}$; $\{f_1, f_2, \dots, f_i, f_m\} \in F$, $m = \overline{1, 1375}$. Множество фактов содержит сведения о диагностированных неисправностях ГПА, подмножество аварийных сообщений системы автоматического управления компрессорной станцией, подмножество внешних факторов, так как, например, как информация о погодных условиях, которые могут оказать влияние на определение причины неисправности и др.; $t_n \in \{T\}$ – множество лингвистических переменных $n = \overline{1, 21}$.

Для формирования БЗ были использованы экспертные знания специалистов ООО «Газпром трансгаз Саратов», а также сведения об отказах ГПА за период 2005–2015 гг. на ЛПУМГ общества Мецкерском. Пример правил приведен в таблице. Причины неисправностей разбиты на 5 групп, схематично представленных на рис. 2.

Рис. 2. Группы причин неисправностей ГПА

Пример правил из БЗ

Номер правила	Экспертное правило	Формализованное правило	Приоритет
R11 R549	ЕСЛИ «Аварийный останов ГПА» И по причине срабатывания сигнализации «Помпаж ГТД» И сигнализация «Высокое разрежение на всасе всасывающем тракте в ГТД» ТО СКОРЕЕ ВСЕГО примерзание байпасного клапана воздухоочистного устройства ИЛИ обмерзание фильтров ВОУ	ЕСЛИ f_{326} И f_{10} И f_{347} ТО f_{346} ЕСЛИ f_{326} И f_{10} И f_{347} ТО f_{1377}	80
R118 R550	ЕСЛИ «Аварийный останов ГПА» И по причине срабатывания сигнализации «Низкий перепад давления на РПД масло – газ» И включен пусковой насос уплотнения ТО ВЕРОЯТНО выход из строя навесного главного масляного насоса ИЛИ выход из строя РПД	ЕСЛИ f_{132} И f_{16} И f_{427} ТО f_{428} ЕСЛИ f_{132} И f_{16} И f_{427} ТО ВЕРОЯТНО f_{470}	80

Примеры функций принадлежности лингвистических переменных «скорее всего» и «вероятно» графически представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Математически функция принадлежности лингвистической переменной «скорее всего» записывается следующим образом:

$$f(x) = 10x - 7; \quad (3)$$

$$g(x) = -10x + 10; \quad (4)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 0,7, \\ 10x - 7, & 0,7 < x \leq 0,8, \\ 1, & 0,8 < x \leq 0,9, \\ -10x + 10, & 0,9 < x \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Рис. 3. График функции принадлежности лингвистической переменной «скорее всего»

Рис. 4. График функции принадлежности лингвистической переменной «вероятно»

Математически функция принадлежности лингвистической переменной «вероятно» представлена:

$$f(x) = 10x - 5; \quad (6)$$

$$g(x) = -10x + 8; \quad (7)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 0,5, \\ 10x - 2, & 0,5 < x \leq 0,6, \\ 1, & 0,6 < x \leq 0,7, \\ -10x + 7, & 0,7 < x \leq 0,8 \\ 0, & 0,8 < x \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

Для принятия решения экспертная система использует алгоритм нечеткого вывода Мамдани [8].

Программное обеспечение ЭС GASDETECT реализовано в среде программирования Visual Studio 2015 на языке C#.

Заключение

Сложность ГПА как объекта исследования не позволяет получить универсальное решение, что вызывает трудности при разработке алгоритмов диагностики неисправностей и требует сочетания различных методов и подходов. В статье описано решение задачи диагностики неисправностей ГПА с использованием экспертной системы GASDETECT, позволяющей на основе экспертных знаний и ретроспективных данных своевременно диагностировать неисправности, обеспечивает своевременный ремонт и техническое обслужи-

вание агрегатов. Кроме того, установление причин неисправности повышает вероятность устранения допущенных в ходе эксплуатации нарушений или обнаружения заводских и иных дефектов в деталях оборудования.

Библиографические ссылки

1. Стребков А., Басманов М., Меньшиков С., Морозов И. Система параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов: современный подход // Деловая Россия: промышленность, транспорт, социальная жизнь. – 2011. – №7. – С. 42–43.
2. Сафонов В. С., Леонтьев Е. В., Щуровский В. А. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. – ОАО «Газпром», 2005.
3. Стребков А., Басманов М., Меньшиков С., Морозов И. Система параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов: современный подход. С. 42–43.
4. Учеб. пос. для подготовки и повышения квалификации рабочих и специалистов службы ГКС / П. Г. Антропов, В. Н. Замоторин, В. Н. Захаров и др. – Петровск : Юг-Трансгаз, 2000. – 145 с.
5. Стребков А., Басманов М., Меньшиков С., Морозов И. Система параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов: современный подход. С. 42–43.
6. Учеб. пос. для подготовки и повышения квалификации рабочих и специалистов службы ГКС / П. Г. Антропов, В. Н. Замоторин, В. Н. Захаров и др.
7. Способ диагностики неисправностей газоперекачивающих агрегатов с использованием гибридных интеллектуальных систем / П. Г. Антропов, О. Н. Долинина, А. К. Кузьмин, А. Ю. Шварц // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. ак. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-та). – 2014. – № S5-1. – С. 75–84.
8. Mamdani E. H., Assilian S. An Experiment In Linguistic Synthesis With Fuzzy Logic Controller. International Journal Of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp. 1–13 (1975).

* * *

S. V. Pakhtusov, "Gazprom Transgaz Saratov" Ltd, Saratov
I. I. Evdakimov, "Gazprom Transgaz Saratov" Ltd, Saratov
M. V. Avramov, Phd In Engineering, "Gazprom Transgaz Saratov" Ltd, Saratov
P. G. Antopov, Phd In Engineering, Yury Gagarin State Technical University, Saratov
N. M. Gubin, Yury Gagarin State Technical University, Saratov
O. N. Dolinina, Phd In Engineering, Yury Gagarin State Technical University, Saratov

Expert System for Diagnostics of Faults of Gas Turbines at Gas-Compressor Stations

The paper describes the current situation in diagnostics of faults of gas turbines (GT) at gas compressor stations. It is shown that the applied software can diagnose on-time the GT faults but does not define the reasons of their appearance and, therefore, can not improve the effectiveness of their correctness. The approach is proposed in the paper to solve the problem of diagnostics of GT faults by using the developed expert system GASDETECT on the base of expert and historical data provided by the company "GAZPROM TRANSGAZ SARATOV" Ltd. The structure and fuzzy rules of the expert system are described. The Mamdani fuzzy algorithm is used for making decisions.

Keywords: gas turbines faults, expert system, fuzzy knowledge base, inference rules.

Получено: 09.03.17