

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Антропов П.Г., Долинина О.Н., Кузьмин А.К., Шварц А.Ю.

ФГБОУ ВПО Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия (410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77) olga@sstu.ru

Задача повышения надежности газоперекачивающих систем является важной народохозяйственной задачей. В статье проведен анализ методов оценки неисправностей газоперекачивающих агрегатов, существующее программное обеспечение в данной области, предложен метод выявления неисправностей на основе методов искусственного интеллекта, реализованный в системе принятия решения, основанной на искусственной нейронной сети и нечетком выводе. Нейронная сеть на основе трехслойного персептрона используется для выявления неисправностей, подсистема нечеткого вывода позволяет на основе параметров газоперекачивающих агрегатов, экспертной информации и степеней уверенности в наличии определенного вида неисправностей получить степени уверенности в характерных эксплуатационных или иных причинах отказов. В работе приведен алгоритм нечеткого вывода для выявления причин возникновения неисправностей. Реализовано программное обеспечение системы принятия решения GAZDETECT.

Ключевые слова: неисправности газоперекачивающих агрегатов, интеллектуальная система, искусственная нейронная сеть, алгоритм нечеткого вывода.

USING OF INTELLECTUAL SYSTEMS FOR DIAGNOSTICS OF FAULTS OF GAS TURBINES

Antropov P.G., Dolinina O.N., Kuzmin A.K., Shvarts A.Y.

Saratov State Technical University named after Y.Gagarin, Saratov, Russia (410054, Saratov, st. Polytechnicheskaya 77) olga@sstu.ru

The task of increasing reliability of gas turbines is an important for industry and economy. The analysis of the methods of evaluation of the gas turbine faults and existing software were carried out. There is suggested a method of detecting of the faults based on artificial intelligence: artificial neural network using three-layer perceptron which is used for detecting of the gas turbines' faults and subsystem of fuzzy solution which allows to get the levels of confidence in typical or other reasons of system failures. Fuzzy solution is used on the base of the gas turbines parameters, expert information and levels of confidence in the faults. Algorithm of the fuzzy solution is used in the developed system for detecting of the reasons of the gas turbine faults. There is realized the software GAZDETECT of making solutions.

Keywords: faults of gas turbines, intellectual systems, artificial neural network, algorithm of fuzzy solution

Введение

Обеспечение бесперебойности и высокой эффективности поставки природного газа потребителям в нашей стране и за рубежом уже многие годы является важнейшей задачей систем транспорта и хранения природного газа ОАО «Газпром». Выполнение этой задачи невозможно без эффективной работы основного оборудования компрессорных станций – газоперекачивающих агрегатов (ГПА), которых по стране насчитывается несколько тысяч.

Существующий парк (ГПА) характеризуется широким диапазоном эффективных мощностей (2,5...25 МВт), наработок (до 100 тысяч часов и более), условиями эксплуатации и сервисного обслуживания и т.п.. В силу этой неоднородности показатели надежности эффективности работы, даже однотипных агрегатов в различных дочерних обществах и на разных промплощадках могут существенно различаться. Учитывая непрерывное старение ос-

нового оборудования в условиях диверсификации потоков поставок природного газа в европейской части страны, основными направлениями повышения эффективности и надежности работы действующих ГПА могли бы быть повышение их экономичности, оптимизация режимов эксплуатации, качества ремонта и обслуживания, а так же поддержание экологической приемлемости. Принципиальные возможности достижения этих целей базируются на качественном и своевременном техническом обслуживании и ремонте ГПА, продлении ресурса его эксплуатации без ущерба для показателей эффективности. Таким образом, требуется решение как теоретических, так и практических задач достоверного анализа надежности и безопасности сложных технических систем. Разработка эффективных методов контроля и прогнозирования технического состояния ГПА по основным технологическим параметрам с возможностью выявления дефектов на ранней стадии могло бы лечь в основу решения приоритетной задачи повышения надежности и эффективности газотранспортных систем.

Комплексная оценка технического состояния сложных технических систем базируется на структурировании, анализе надежности структурных элементов и динамических методах контроля. Во многом результат диагностирования технического состояния ГПА предопределяется правильностью подбора наиболее информативных параметров контроля: вибрация, перепады давления, температур, эффективных КПД и др., а так же корректностью построения принципиальных диагностических моделей и методик распознавания.

Описание проблемы

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 и многих других. Исследования по повышению эксплуатационной надежности ГПА проводились ВНИИГАЗ, РГУН и Г им.И.М. Губкина, ОРГ. Энергогаз, ВНИИЭГазпром, Тюм ГНГУ, Саратовским ГТУ и рядом других.

Внимания заслуживает исследование [5], направленное на повышение информативности и достоверности параметров, влияющих на остаточный ресурс ГПА. Был проведен анализ методов определения остаточного ресурса, основных дефектов и особенностей ГПА. Были определены направления исследования агрегатов: прогнозирование, диагностирование и генезирование. В качестве входного параметра для задачи прогнозирования выбрано значение эффективного КПД. Описаны математические методы построения модели прогнозирования остаточного ресурса ГПА и ее оптимизации.

В рамках диагностического направления исследований были выделены три направления: вибродиагностика, параметрическая диагностика и трибодиагностика. Показано, что комплексное использование всех видов диагностики позволяет обеспечить достоверное обнаружение подавляющего большинства возникающих в ГПА неисправностей. Дефекты обо-

рудования, не поддающиеся обнаружению на ранней стадии с помощью существующих технических средств, проявляются в нарушениях, связанных с механическими повреждениями, дефектами поверхностей проточной части, аэродинамикой потока. В работе описаны функциональные зависимости между параметрами ГПА, приведены основные принципы выбора критериев оценки технического состояния для ГПА-16МГ-90 и «Коберра-182». Описаны математические модели вибродиагностики и параметрической диагностики для данных видов агрегатов. На основе исследований был разработан комплекс решений комплексной идентификации технического состояния агрегатов на основе результатов диагностики, проведены натурные исследования, показавшие удовлетворительную сходимость реальных и теоретических параметров.

Однако применение любых методов диагностики и прогнозирования к газоперекачивающим агрегатам подразумевает регулярный сбор данных о техническом состоянии, как всей установки, так и отдельных ее компонентов. В силу географической удаленности станций такой контроль нецелесообразно проводить посредством выезда персонала на все объекты наблюдения. Поэтому более рациональным решением является использование программно-аппаратных комплексов, которые служат цели автоматизации непрерывного сбора информации о работе установки. В настоящее время наибольшее распространение получила автоматизированная система диагностического обслуживания АСДО [2], которая внедрена на ряде предприятий ОАО «Газпром», ООО «Газпром добыча Надым», ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» и выполняет следующие функции:

- формирование математической модели исправного агрегата на основе полученных во время эксплуатационных технических испытаний;
- расчет термогазодинамических параметров состояния проточных частей центробежного нагнетателя (ЦН) и газотурбинной установки (ГТУ) и прогноз изменения их значений;
- отслеживание выхода параметров из допустимого диапазона и формирование диагностических сообщений для оповещения;
- формирование рекомендаций по предпринимаемым мерам, направленным на устранение неполадок и их последствий;
- накопление и визуализация результатов параметрической диагностики.

К недостаткам такого рода систем можно отнести отсутствие функционала выдачи предположений по причинам возникающих отказов. Таким образом, система не оказывает достаточной поддержки в принятии решения для обслуживающего персонала, что понижает степень достоверности определения причин возникновения неисправности, в силу различного уровня экспертных знаний и опыта работы у эксплуатационного персонала. Кроме того,

заложенный в систему математический аппарат не отражает неуверенностей и неточностей, присущих утверждениям в любой предметной области.

Постановка задачи

В силу сложности и многокомпонентности объекта диагностирования задача выявления и предупреждения неисправностей сводится не 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.

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.

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 определенного 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 быстродействием 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 требованиям к быстродействию системы диагностики.

Таким образом, использование методов ИИ в разработке программного комплекса диагностики неисправностей ГПА позволит в необходимой степени удовлетворить основным

требованиям к диагностике и создать расширяемую платформу для дальнейшей доработки и модификации.

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривается газоперекачивающий агрегат с газотурбинным приводом, принципиальная схема которого приведена на рис.1.

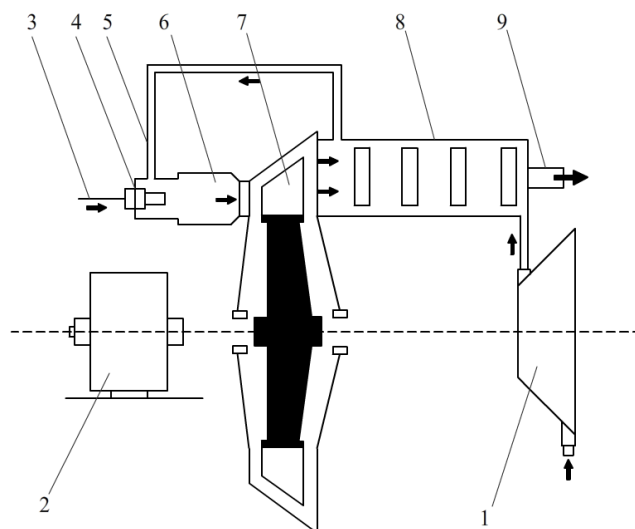


Рисунок 1. Принципиальная схема газотурбинной установки с регенерацией (1 – компрессор, 2 – потребитель, 3 – топливный трубопровод, 4 – форсунка, 5 – воздушный трубопровод, 6 – камера сгорания, 7 – лопатки турбины, 8 – теплообменник, 9 - патрубок)

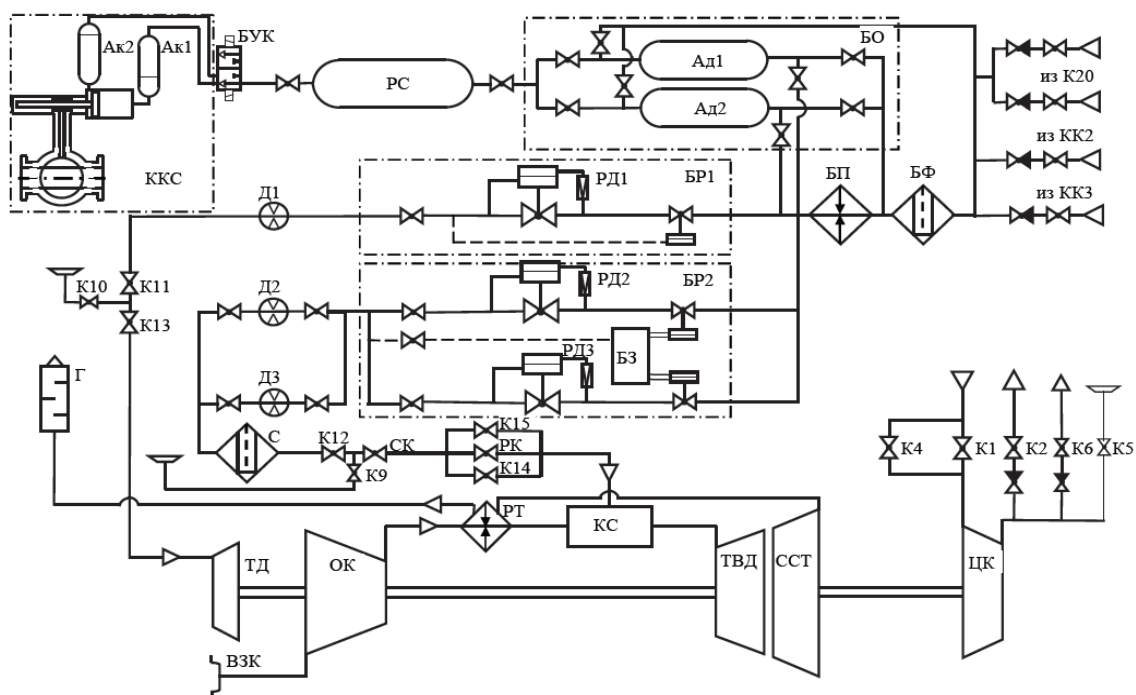


Рисунок 2. Технологическая схема ГПА и обвязка с газотурбинным приводом

Условные обозначения: Ад1 и Ад2 – адсорберы; БЗ – блок защиты; БО – блок осушки; БП – блок подогревателей; БР1, БР2 – блоки редуцирования; БУК – блок управления крана; БФ – блок фильтров; ВЗК – воздухозаборная камера; Д1, Д2, Д3 – датчики; К1-К20 – краны; КС – камера сгорания; ОК – осевой компрессор; РК – регулирующий клапан; РС – ресивер; РТ – регенеративный теплообменник; РД1, РД2, РД3 – регуляторы давления; С – сепаратор; ССТ – свободная силовая турбина (ТНД); ТВД – турбина высокого давления; ТД – турбодетандер (пусковой); ЦК – центробежный компрессор.

Для анализа связи параметров ГПА, неисправностей и их причин было сформировано множество $Y = \{y_1, \dots, y_{18}\}$, где каждому элементу поставлена в соответствие степень уверенности в наличии определенной неисправности: y_1 - изменение проходной площади соплового аппарата турбины высокого давления (ТВД); y_2 - увеличение радиальных зазоров осевого компрессора (ОК); y_3 - увеличение радиальных зазоров турбины; y_4 - увеличение зазоров в концевых уплотнителях; y_5 - негерметичность воздушного тракта регенератора; y_6 - вредный подогрев на входе компрессора; y_7 - увеличение сопротивления входного тракта ГТУ; y_8 - увеличение сопротивления тракта высокого давления; y_9 - увеличение сопротивления выходного тракта ГТУ; y_{10} - загрязнение проточной части компрессора; y_{11} - эрозия элементов проточной части центробежного нагнетателя (ЦН); y_{12} - увеличение зазора в уплотнениях ЦН; y_{13} - уменьшение запаса устойчивой работы ОК (предпомпаж); y_{14} - уменьшение запаса устойчивой работы ЦН; y_{15} - выгорание элементов камеры сгорания (КС); y_{16} - коробление, занос, обрыв лопастного аппарата турбины высокого давления (турбины низкого давления); y_{17} - негерметичность проточной части газотурбинного двигателя (ГТД); y_{18} - занос фильтрующих элементов воздухозаборной камеры (ВЗК).

В ходе анализа предметной области было сформировано множество $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{26}\}$, каждому элементу которого поставлено в соответствие значение параметров ГПА: x_1 - барометрическое давление; x_2 - температура наружного воздуха; x_3 - разрежение перед ОК; x_4 - температура перед ОК; x_5 - давление за ОК; x_6 - температура за ОК; x_7 - давление за регенератором; x_8 - температура за регенератором; x_9 - температура перед ТВД; x_{10} - давление за ТНД №1; x_{11} - давление за ТНД №2; x_{12} - температура за ТНД; x_{13} - обороты ротора ТВД; x_{14} - обороты ротора ТНД; x_{15} - давление газа перед нагнетателем; x_{16} - давление газа за нагнетателем; x_{17} - температура газа за нагнетателем; x_{18} - температура газа перед нагнетателем; x_{19} - разница температур газа на входе и выходе ОК; x_{20} - расход воздуха через ОК;

x_{21} - эффективный КПД; x_{22} - КПД нагнетателя; x_{23} - степень сжатия; x_{24} - частота вращения ротора силовой турбины (ССТ или ТНД); x_{25} - уровень вибрации; x_{26} - уровень шума.

Кроме того, каждая неисправность может быть вызвана одной или несколькими эксплуатационными или иными причинами. Было сформировано множество $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{26}\}$, каждому элементу которого поставлено в соответствие степень уверенности в наличии определенной причины неисправностей: z_1 - коробление обоймы; z_2 - деформация, обрывом лопаток; z_3 - вибрация ротора; z_4 - перекося, расцентровка ротора; z_5 - дефекты подшипников; z_6 - температурные деформации при пусках и остановках ГПА; z_7 - отсутствие изоляции на регенераторах и газоходах; z_8 - неправильная компоновка ГПА на КС; z_9 - неплотность запорных клапанов систем анти-обледенения, тяги регенератора; z_{10} - обледенение входного тракта; z_{11} - пылевые отложения во входном тракте; z_{12} - эрозия (износ) входного тракта ГТУ; z_{13} - пылевые отложения в тракте высокого давления; z_{14} - эрозия (износ) тракта высокого давления; z_{15} - деформация выходного тракта ГТУ; z_{16} - рост отложений в выходном тракте ГТУ; z_{17} - уменьшение эффективности очистки воздуха, невыполнение периодических чисток; z_{18} - уменьшение эффективности очистки технологического газа (пылеуловители); z_{19} - вибрация, осевой сдвиг ЦН; z_{20} - уменьшение проходной площади ТВД; z_{21} - увеличение сопротивления входного тракта; z_{22} - ускоренный запуск; z_{23} - износ лопаток; z_{24} - уменьшение массового расхода воздуха; z_{25} - увеличение степени сжатия при постоянной частоте вращения ротора ($n_{cm} = const$); z_{26} - подрез рабочего колеса.

Кроме причинно-следственных связей между параметрами системы и неисправностями, а также неисправностями и их эксплуатационными системами, существуют также связи между самими параметрами, между неисправностями и между их причинами. Наличие сложных транзитивных зависимостей обуславливает структуру разрабатываемой интеллектуальной системы.

Интеллектуальная система для принятия решения по диагностике неисправностей ГПА

В настоящее время все большее значение приобретают гибридные интеллектуальные системы принятия решения, комбинирующие различные модели представления знаний [3]. Для решения задачи диагностики неисправностей ГПА Разработанный программный комплекс GAZDETECT для диагностики неисправностей ГПА основан на гибридной интеллектуальной системе, структура которой приведена на рис. 3. Основными компонентами системы являются искусственная нейронная сеть (ИНС) и подсистема нечеткого вывода.

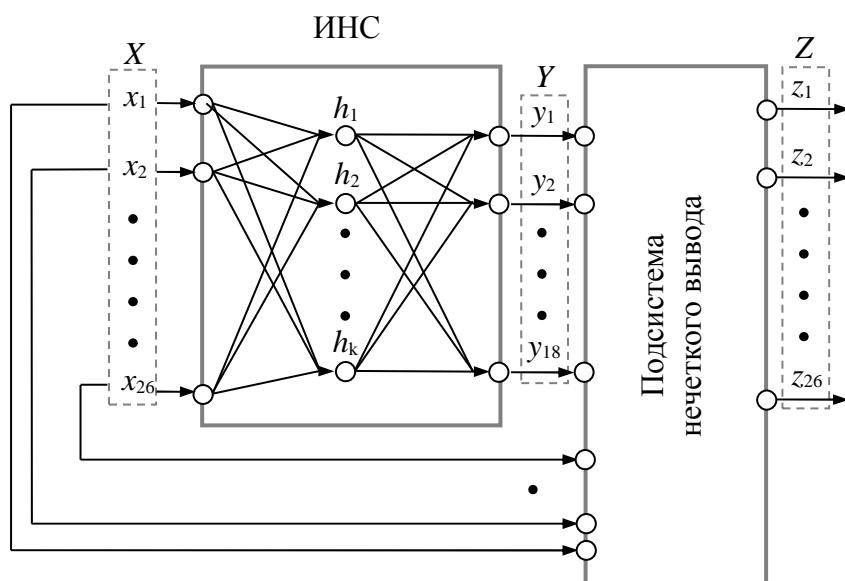


Рисунок 3. Структурная схема интеллектуальной системы принятия решения по диагностике неисправностей ГПА

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{26}\}$ – входной вектор системы, содержащий числовые значения параметров ГПА;

h_1, \dots, h_n – нейроны скрытого слоя ИНС;

$Y = \{y_1, \dots, y_{18}\}$ – выходной вектор ИНС и входной вектор подсистемы нечеткого вывода, содержащий степени уверенности в наличии характерных неисправностей;

R – база нечетких правил;

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{26}\}$ – выходной вектор системы, содержащий степени уверенности в наличии причин неисправностей.

Степени уверенности в наличии неисправностей и их причин лежат на интервале $[0;1]$, где 0 – самая низкая степень уверенности, 1 – самая высокая.

ИНС служит для выявления неисправностей на основе значений и динамики изменения параметров ГПА. Полученные степени уверенности в совокупности с уже поданными на вход ИНС параметрами используются подсистемой нечеткого вывода для выявления возможных причин возникновения неисправностей.

ИНС имеет структуру трехслойного персептрона, обученного алгоритмом обратного распространения ошибки. Обучающая выборка была составлена на основе норм технологического проектирования магистральных газопроводов [2, 4] и мнений экспертов - специалистов по техническому обслуживанию ГПА [1].

Подсистема нечеткого вывода

Работа подсистемы нечеткого вывода использует аппарат теории нечетких множеств. Структурная схема подсистемы представлена на рис. 4.

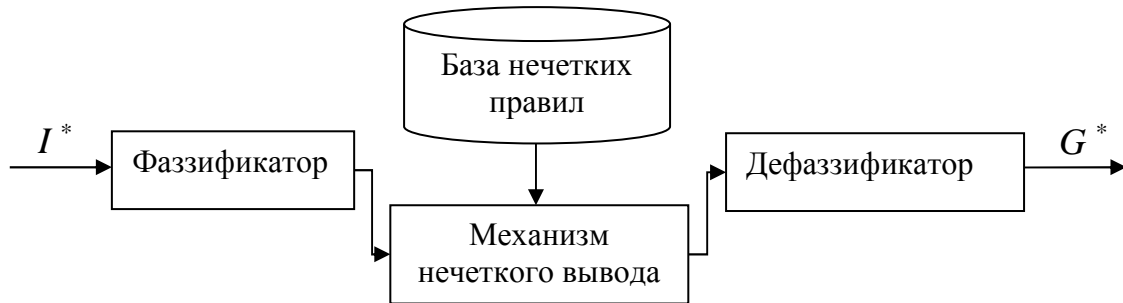


Рис. 4. Схема подсистемы нечеткого вывода

I^* - вектор входных числовых значений подсистемы;

G^* - вектор выходных числовых значений подсистемы.

Рассматриваемая база нечетких правил может быть представлена в виде

$$(V, I, G, R), \quad (1)$$

где V - универсальное множество лингвистических переменных, используемых системой,

I - множество входных лингвистических переменных, $I \subset V$,

G - множество выходных лингвистических переменных, $G \subset V$,

R - множество правил вида

$$r_j: \text{ЕСЛИ } i_{j,1} \text{ есть } t_{j,1} \text{ И } \dots \text{ И } i_{j,n-1} \text{ есть } t_{j,n-1} \text{ ТО } g_j \text{ есть } t_j, \quad (2)$$

где r_j – уникальное имя правила,

$i_{j,1}, \dots, i_{j,n-1}$ – входные лингвистические переменные для правила r_j ,

$t_{j,1}, \dots, t_{j,n-1}$ – значения входных лингвистических переменных для правила r_j ,

g_j – выходная лингвистическая переменная для правила r_j ,

t_j – значение выходной лингвистической переменной для правила r_j .

Будем считать, что на вход подсистемы подается вектор I^* четких значений, соответствующих лингвистическим переменным множества I . Выходом подсистемы является вектор G^* четких значений, соответствующих лингвистическим переменным множества G .

Промежуточной будем считать переменную $v_m \in V$, $v_m \notin I$, $v_m \notin G$.

Утверждением будем считать пару

$$\langle v_m, t_{m,k} \rangle, \quad (3)$$

где $v_m \in V$ - лингвистическая переменная,

$t_{m,k} \in T(v_m)$ - значение лингвистической переменной.

Каждому утверждению в соответствие поставлена нечеткая переменная $f_{m,k}$.

Будем считать входными правила $r_j \in R$, в левой части которых содержатся только те утверждения, которые содержат входные лингвистические переменные.

В ходе консультаций с экспертом было определено множество $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ (t_1 – “очень низкое“, t_2 – “низкое“, t_3 – “среднее“, t_4 – “высокое“, t_5 – “очень высокое“) лингвистических значений, связанных с числовыми значениями параметров функциями принадлежности. Кроме того, были определены исключительные ситуации, когда значением лингвистической переменной является не выражение на естественном языке, а утверждение вида “ $x_i > b_i$ ” или “ $x_i < b_i$ ”, где x_i – числовое значение параметра, b_i - определенная экспертом верхняя или нижняя граница параметра, допускаемая технической документацией.

Также были сформировано множество правил R , примеры которых приведены ниже.

R₁₅: ЕСЛИ <отклонение давления за ТНД №1> <очень высокое>
И <отклонение давления за ТНД №2> <очень высокое>
ТО <загрязнение проточной части компрессора> <высокое>

R₂₇: ЕСЛИ <колебание температуры за нагнетателем> <высокое>
И <колебание температуры перед нагнетателем> <высокое>
ТО <повышение вибрации> <высокое>

R₃₄: ЕСЛИ <понижение эффективного КПД> <высокое>
ТО <увеличение сопротивления входного тракта ГТУ> <высокое>

R₄₅: ЕСЛИ <понижение барометрического давления> <высокое> ТО <понижение давления за ОК> <среднее>

Алгоритм нечеткого вывода

Шаг 1. Для каждого входного правила r_j вычисляются значения истинности всех утверждений

$$\delta_{j,n} = \mu_{j,n}(i_{j,n}^*), \quad (4)$$

где $i_{j,n}^*$ - четкое значение, соответствующее лингвистической переменной $i_{j,n}$

в левой части правила r_j .

Шаг 2. Для каждого входного правила r_j вычисляется уровень отсечения

$$\beta(\langle g_j, t_j \rangle) = \sigma(\delta_{j,1}, \sigma(\delta_{j,2}, \dots, \sigma(\delta_{j,n-1}, \delta_{j,n}))), \quad (5)$$

где.

$$\sigma(x_1, x_2) = x_1 + x_2 - x_1 \cdot x_2, \quad (6)$$

Шаг 3. Для каждого входного правила r_j формируется усеченная функция принадлежности каждого утверждения в левой части правила

$$\mu'_{f_{m,k}}(x) = \mu_{f_{m,k}}(x) \cdot \min_j \beta(\langle g_j, t_j \rangle), \quad (7)$$

где пара $\langle g_j, t_j \rangle$ соответствует нечеткой переменной $f_{m,k}$

Шаг 4. Для каждой лингвистической переменной $v_m \in V$, стоящей в правой части хотя бы одного входного правила r_j , формируется результирующая функция принадлежности

$$\mu_{v_m}(x) = \max_k \mu'_{f_{m,k}}(x), \quad (8)$$

Шаг 5. Для каждой лингвистической переменной $v_m = g_j \in V$, стоящей в правой части каждого входного правила r_j , вычисляется четкое значение

$$v_m^* = \frac{\int x \cdot \mu_{v_m}(x) dx}{\int \mu_{v_m}(x) dx}, \quad (9)$$

Шаг 6. Шаги 1-5 повторяются для каждого правила $r_j \in R$ до тех пор, пока не будут вычислены четкие значения, соответствующие каждой выходной лингвистической переменной. Полученные четкие значения формируют выходной вектор G^* .

Таким образом, подсистема нечеткого вывода позволяет на основе параметров ГПА и степеней уверенности в наличии определенного вида неисправностей получить степени уверенности в характерных эксплуатационных или иных причинах отказов.

Заключение

Обеспечение эффективной и бесперебойной работы газоперекачивающих агрегатов является важной задачей газотранспортной промышленности. Достижение требуемых показателей требует использования комплекса методологического и программного обеспечения для выявления неисправностей ГПА. С целью разработки соответствующего комплекса предложена интеллектуальная система GAZDETECT принятия решения для диагностики, позволяющая на основе параметров агрегата своевременно обнаруживать характерные отказы в ра-

боте устройства, что приводит к повышению безопасности труда, обеспечивает своевременный ремонт и техническое обслуживание установки. Кроме того, установление причин неисправности повышает вероятность устранения допущенных в ходе эксплуатации нарушений или обнаружения заводских и иных дефектов в деталях оборудования.

Список литературы

1. Антропов П.Г., Замоторин В.Н., Захаров В.Н. и др.: учеб. пос. для подготовки и повышения квалификации рабочих и специалистов службы ГКС. – ЮгТрансгаз, Петровск, 2000. – 145 с.
2. Басманов М., Меньшиков С., Морозов И., Стребков А., Система параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов: современный подход // Деловая Россия: промышленность, транспорт, социальная жизнь, №7, с. 42-43, 2011.
3. Долинина О.Н., Кузьмин А.К. Особенности создания экспертных систем, основанных на нейросетевом представлении знаний // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. №2 (33), с.266-272.
4. Леонтьев Е.В., Сафонов В.С., Щуровский В.А. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов // ОАО «Газпром», 2005.-193 с.
5. Семенов А.А. Комплексный анализ работоспособности газоперекачивающих агрегатов на основе прогноза остаточного ресурса: дис... канд. техн. наук. – М., 2004.

Рецензенты:

Кушников В.А., д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем управления и точной механики РАН РФ, г.Саратов.

Эфендиев А.М., д.т.н., профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий АПК» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Вавилова Н.И.», г.Саратов.