

УДК 629.7.03.001; 004.52.3

Кораблёв Ю. А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Разработка нечеткой отказоустойчивой системы управления процессом транспорта газа

Рассматриваются вопросы организации нечеткого отказоустойчивого управления процессом транспорта газа. Актуальность вопросов обеспечения отказоустойчивости связана с необходимостью повышения безопасности технологических операций, обеспечивающих транспортировку газа. Основное внимание уделяется разработке алгоритмов нечеткой диагностики и обеспечения отказоустойчивости работы типовых исполнительных механизмов (двухпозиционного технологического крана, обеспечивающего открытие или перекрытие трубы, вентилятора АВО газа, насоса маслосистемы). Продемонстрированы принципы построения базы правил отказоустойчивой системы управления. Особенностью данной базы правил является решение в ЕСЛИ-частях правил задачи диагностики, а в ТО- и ИНАЧЕ-частях правила в зависимости от диагноза реализуется управление в нормальном режиме или обеспечивается отказоустойчивость управления при наличии неисправности.

Нечеткая отказоустойчивая система управления, база правил, диагностика, обнаружение неисправностей

Концепции построения типового модуля нечеткого управления для систем управления и диагностики технологического процесса транспортировки газа. В соответствии с иерархической структурой системы транспорта газа задачи диагностики могут быть также разделены по «вертикали» на три уровня: «газоперекачивающий агрегат – компрессорный цех – компрессорная станция» («ГПА–КЦ–КС») [1]. Анализ литературы и технических отчетов по НИР в области моделирования и управления процессом транспорта газа на иерархических «ГПА–КЦ–КС» позволяет оценить состояние дел в данной области автоматизации:

1. На текущий момент не существует единого математического описания процесса транспорта газа.

2. Известные частные модели, описывающие разные фрагменты единого технологического цикла, как правило, нуждаются в адаптации к конкретным природным и техническим условиям эксплуатации, что в общем случае представляет весьма сложную задачу как в теоретическом, так и в практическом плане.

3. Процессы управления и диагностики как технологическим процессом в целом, так и отдельными операциями в значительной мере основаны на опыте эксплуатации, эмпирических правилах и рекомендациях, учитывающих особенности технологического оборудования и условия эксплуатации.

4. Система автоматизации газоперекачивающего комплекса строится по схеме «снизу вверх», т. е. обеспечивается решение частных задач управления и диагностики начиная с нижнего уровня, и далее в результате достаточно хаотического интегрирования полученного комплекса решений на более высоких уровнях осуществляется организация системы в соответствии с общей технологической схемой. Частным проявлением этого служит исключительное разнообразие подходов к решению отдельных задач управления и диагностики, недостаточная их типизация, унификация и стандартизация.

Основываясь на отмеченных особенностях, в рамках обобщенной схемы видится целесообразной разработка концепции построения типового модуля для систем управления и диагностики технологического процесса транспортировки газа на основе интеллектуализации управления на разных иерархических уровнях организации системы «ГПА–КЦ–КС».

Исходя из необходимости комбинирования, в рамках единого математического описания количественной и качественной информации предлагается использовать для этой цели математический аппарат нечеткой логики и базирующиеся на ней основные подходы к организации нечеткого управления и диагностики.

Применение fuzzy-технологий для исследуемых систем позволит [2]–[4]:

- структурировать качественные знания технологов, их опыт, интуицию и преобразовать их в формальные алгоритмы, которые могут быть реализованы программно или аппаратно;
- рассматривать имеющиеся схемы логико-командного управления как частный случай нечеткого управления, поскольку нечеткая логика представляет собой обобщение классической булевой логики;
- осуществлять нечеткое копирование классических регуляторов, например пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД-регуляторов), что позволит на первом этапе заменить классические регуляторы эквивалентными нечеткими, а в дальнейшем оптимизировать их за счет возникновения дополнительных степеней свободы при проектировании.

Специфика предлагаемой концепции построения нечеткой системы отказоустойчивого управления заключается в следующем. Все многообразие управляемых и диагностируемых процессов может быть охвачено типовой процедурой нечеткого управления и диагностики, реализуемой в составе типового модуля нечеткого управления и диагностики.

Концепция построения типового модуля нечеткого управления и диагностики предполагает

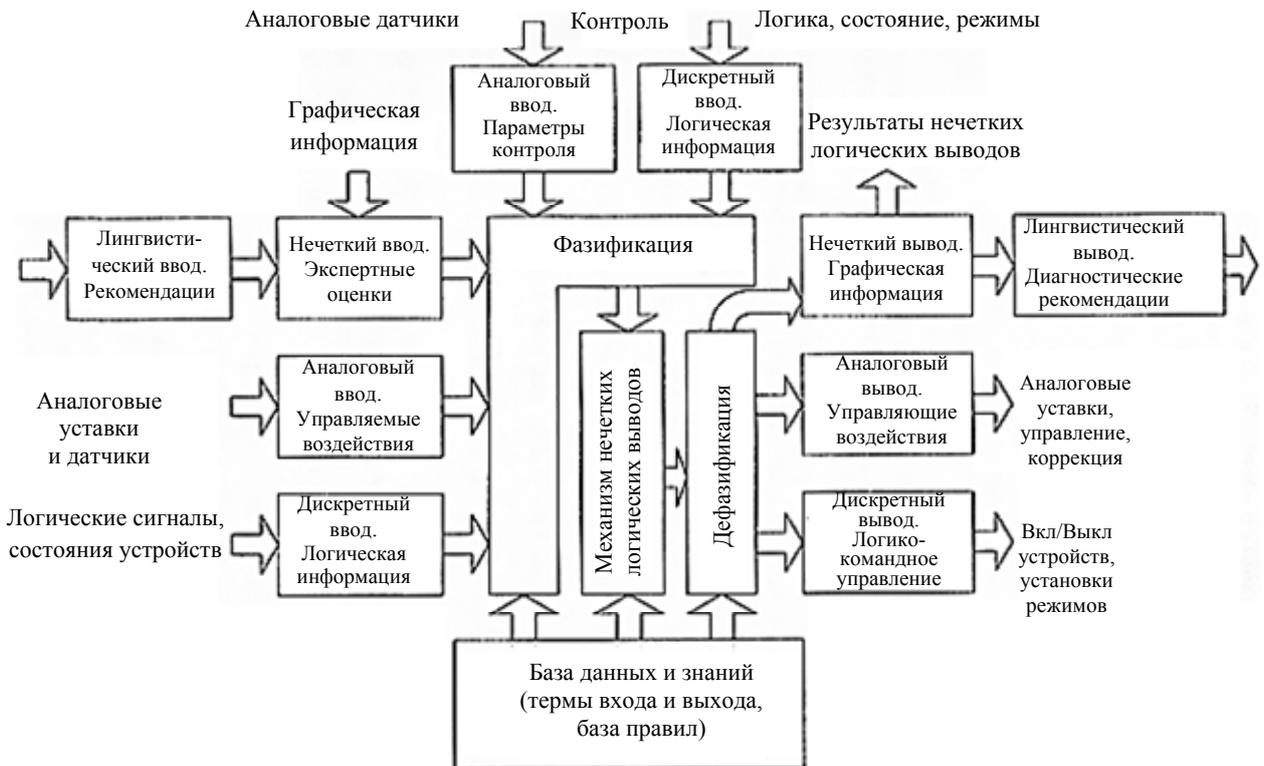
разделение всех координат технологического процесса на три группы (на рисунке представлен типовой модуль нечеткого управления):

1. Управляющие воздействия, обеспечивающие реализацию технологического цикла транспорта газа. Вывод управляющих воздействий реализуется следующими модулями:

- аналогового вывода (уставки в режиме супервизорного управления, управляющие воздействия в режиме прямого цифрового управления);
- дискретного вывода, реализующего логико-командное управление процессом (включение, выключение оборудования, установка режимов работы, программирование таймеров);
- нечеткого вывода, предоставляющего оперативную информацию для формирования рекомендаций по ведению технологического процесса, диагностики технического состояния оборудования;
- лингвистического вывода, если требуется преобразование графического представления нечеткого логического вывода в форму лингвистического описания.

2. Управляемые координаты, определяющие качественные показатели процесса транспорта газа. Ввод данных осуществляется модулями:

- аналогового ввода (сигналы датчиков);
- дискретного ввода логико-статусной информации технологического процесса (контроль, вклю-



чение/выключение оборудования, установленных режимов работы, показаний таймеров и т. п.);

– нечеткого ввода для учета имеющейся неопределенной и неprecизионной информации, важной с точки зрения проведения процесса;

– лингвистического ввода, если нечеткая информация представлена в разговорной форме.

3. Контролируемые координаты, которые необходимо учитывать при формировании управляющих воздействий и проведении диагностики, обрабатываемые модулями аналогового и дискретного ввода.

Обработка всей информации от входа до выхода независимо от типа данных может осуществляться по единой схеме:

1. Фазификация – перевод информации из четкой количественной формы в нечеткую качественную.

2. Формирование нечеткого логического вывода в соответствии с базой правил, определяющей стратегию управления.

3. Дефазификация – формирование четкого управляющего воздействия на основании полученного результирующего нечеткого логического вывода.

Большая часть задач системы связана с задачами формирования и реализации структуры транспортировки газа, которые состоят в том, чтобы преобразовывать обобщенные команды для перевода энергетического оборудования на новый режим, изменяя положение исполнительных механизмов в рамках структуры перекачки газа, а также вырабатывая сигналы, подаваемые на исполнительные механизмы и обеспечивающие их организационную перестановку. При этом требуется диагностировать неисправности исполнительных механизмов.

Диагностика типовых исполнительных механизмов. Типовые исполнительные механизмы, наиболее часто используемые при транспортировке газа, имеют два конечных положения (включено/отключено, открыт/закрыт и т. д.). Как минимум одно из положений, а иногда оба, в целях диагностики могут наблюдаться при помощи сигнализаторов (концевых выключателей).

Существует два типа приводов исполнительного механизма [1], когда управление осуществляется либо кратковременной подачей двух команд включения и отключения (магнитный пускатель, электропневмоусилитель и т. д.), либо непрерывной подачей одной команды на включение

(реле без самоблокировки). В последнем случае снятие команды приводит к отключению механизма. Классифицировать исполнительные механизмы можно по количеству сигнализаторов – 1 или 2, и по количеству командных сигналов – 1 или 2. Будем рассматривать максимальную конфигурацию исполнительного механизма, остальные могут быть представлены как частные случаи.

Таким образом, одна из главных особенностей диагностики процесса транспортировки газа – это ее реализация в условиях логико-командного управления, что накладывает особенности и на процесс диагностики.

Диагностика двухпозиционного технологического крана, обеспечивающего открытие или перекрытие трубы. На кран подаются обобщенные команды «открыть» и «закрыть» от системы управления. Кран имеет привод, который приводится в действие электрическими сигналами «закрыть_кран» и «открыть_кран». Обратная связь осуществляется сигнализаторами конечного положения (концевыми выключателями), входами системы диагностики, которые выдают по результатам диагностики электрические сигналы «кран_открыт» и «кран_закрыт». При разработке базы правил системы диагностики следует учесть следующие особенности эксплуатации оборудования:

1. Перемещение крана из одного конечного положения в другое занимает некоторое время.

2. Находящийся в конечном положении кран может немного «отойти» назад (типичная неисправность), это нужно компенсировать дополнительной командой на привод.

3. При некоторых неисправностях привода возможна самопроизвольная перестановка крана, что относится к опасным нештатным ситуациям и должно быть диагностировано.

4. Превышение допустимого времени перемещения крана из одного конечного положения в другое служит признаком неисправности привода, крана или концевых выключателей и должно быть диагностировано.

Таким образом, можно ввести следующие входные и выходные переменные:

Входные (от системы управления и объекта управления):

1. Открыть.
2. Закрыть.
3. Кран_открыт.
4. Кран_закрыт.

Выходные:

1. Открыть_кран.
2. Закрыть_кран.
3. Неперестановка_крана_при_закрытии.
4. Неперестановка_крана_при_открытии.
5. Самопроизвольное_закрытие_крана.
6. Самопроизвольное_открытие_крана.

Четкой переменной, характеризующей состояние процесса перестановки крана из одного конечного положения в другое, является *время_перестановки*. С ней взаимодействуют процедуры *Запустить_счетчик_времени_перестановки* и *Сбросить_счетчик_времени_перестановки*. Эта четкая переменная преобразуется в нечеткую, имеющую термы «нулевое_время_перестановки», «малое_время_перестановки» и «большое_время_перестановки». Аналогичные переменные – это *время_подачи_команды*, *время_дожима_конечного_положения*, *время_поджима_конечного_положения* (дожим – подача команды в течение некоторого времени после прихода датчика в конечное положение, поджим – подача команды для возврата в необходимое по-

ложение). Также к необходимым четким переменным относится *нормальное_положение_крана* (например, 0 – открыт, 1 – закрыт). Эта переменная необходима для того, чтобы обеспечить возврат крана в положение, заданное системой управления, при его самопроизвольном отходе от конечного положения.

База правил системы диагностики приведена в таблице. Здесь процессы диагностики и отказоустойчивого управления рассматриваются как единый механизм нечетких логических выводов на основе базы правил, где в ЕСЛИ-части правила решается задача диагностики, а в ТО- и ИНАЧЕ-частях правила в зависимости от диагноза реализуется управление в нормальном режиме или обеспечивается отказоустойчивость управления при наличии неисправности [5], [6].

Диагностика вентилятора АВО газа, имеющего две команды и один сигнализатор включения. Вентилятор АВО (аппарат воздушного охлаждения) имеет электропривод, управляемый от магнитного пускателя. Пускатель выдает управляющие сигналы «*включить_вентилятор*»

Правило	Предпосылка	Заключение	
	ЕСЛИ	ТО	ИНАЧЕ
1	((закрыть = 1) ИЛИ (нормальное_положение_крана = 1) И НЕ (открыть = 1))	Нормальное_положение_крана = 1	Нормальное_положение_крана = 0
2	(кран_открыт = 0) И (кран_закрыт = 0)	Запустить_счетчик_времени_перестановки	Сбросить_счетчик_времени_перестановки
3	(открыть_кран = 1) ИЛИ (закрыть_кран = 1)	Запустить_счетчик_времени_подачи_команды	Сбросить_счетчик_времени_подачи_команды
4	(открыть_кран = 1) И (кран_открыт = 1) ИЛИ (закрыть_кран = 1) И (кран_закрыт = 1)	Запустить_счетчик_времени_дожима	Сбросить_счетчик_времени_дожима
5	(нормальное_положение_крана = 1) И (кран_закрыт = 0) ИЛИ (нормальное_положение_крана = 0) И (кран_открыт = 0)	Запустить_счетчик_времени_поджима	Сбросить_счетчик_времени_поджима
6	(закрыть = 1) И НЕ ((большое_время_дожима) ИЛИ (большое_время_подачи_команды)) ИЛИ (нормальное_положение_крана = 1) И (малое_время_поджима) И НЕ (большое_время_поджима)	Закрыть_кран = 1	Закрыть_кран = 0
7	(открыть = 1) И НЕ (большое_время_дожима) ИЛИ (большое_время_подачи_команды)) ИЛИ (нормальное_положение_крана = 0) И (малое_время_поджима) И НЕ (большое_время_поджима)	Открыть_кран = 1	Открыть_кран = 0
8	(нормальное_положение_крана = 1) И (большое_время_подачи_команды)	Неперестановка_крана_при_открытии = 1	Неперестановка_крана_при_открытии = 0
9	(нормальное_положение_крана = 0) И (большое_время_подачи_команды)	Неперестановка_крана_при_закрытии = 1	Неперестановка_крана_при_закрытии = 0
10	(нормальное_положение_крана = 1) И (большое_время_поджима)	Самопроизвольное_открытие_крана = 1	Самопроизвольное_открытие_крана = 0
11	(нормальное_положение_крана = 0) И (большое_время_поджима)	Самопроизвольное_закрытие_крана = 1	Самопроизвольное_закрытие_крана = 0

и «выключить вентилятор». Все приведенные рассуждения, касающиеся самопроизвольных срабатываний и несрабатываний исполнительного механизма, справедливы и для вентилятора с заменой «открыть» на «включить», «закреть» на «выключить». Кроме того, понадобится изменить параметры функций принадлежности термов переменных, характеризующие время перестановки, подачи команды, поджима и дожима. Для искусственного формирования недостающего входного сигнала «вентилятор_выключен» следует ввести дополнительную внутреннюю переменную, формируемую следующим образом:

ЕСЛИ (вентилятор_включен = 1) ТО вентилятор_выключен = 0 ИНАЧЕ вентилятор_выключен = 1.

С учетом этого дополнения база правил для исполнительного механизма с одним сигнализатором (вентилятора АВО) полностью совпадает с базой правил для исполнительного механизма с двумя сигнализаторами (технологического крана).

Диагностика насоса маслосистемы, имеющего одну команду и один сигнализатор включения. Обычно насосы маслосистемы имеют электропривод, управляемый одной командой. Сигнализатор включения тоже обычно один, но, как показано ранее, эта ситуация сводится к двум сигналам простым преобразованием. Для формирования выходного сигнала включения нужно преобразовать два импульсных сигнала в один потенциальный, например при помощи RS-триггера:

ЕСЛИ (включить_насос = 1) ИЛИ (команда_на_включение = 1) И (выключить_насос = 0) ТО команда_на_включение = 1 ИНАЧЕ команда_на_включение = 0.

Такое дополнение позволяет использовать ту же базу правил, что и для других исполнительных механизмов.

В результате получена база правил диагностики с общим ядром и двумя варьируемыми блоками, позволяющая диагностировать все основные типы исполнительных механизмов и управлять ими.

Аналогичные диагностические правила могут быть сформулированы для всех уровней иерархии «КС–КЦ–ГПА». Например, можно определить следующие диагностические правила и правила обеспечения отказоустойчивости и при необходимости описать их на языке нечеткой логики [1], [7]:

1. Если давление на входе рассматриваемого КЦ ниже, чем на входе другого КЦ, то следует открыть входную перемычку, иначе – открытие входной перемычки запрещено.

2. Если давление на выходе рассматриваемого КЦ ниже, чем на выходе другого КЦ, то следует открыть выходную перемычку, иначе – открытие выходной перемычки запрещено.

3. Если аварийный останов вызван сигналом «Пожар», то сразу отключаются все вентиляторы. После деблокировки аварии устанавливается обобщенный режим «ГПА неисправен», режим «Ремонт».

4. Если все исполнительные механизмы находятся в положениях, соответствующих холодному резерву, нет активных режимов и давление газа на входе и выходе меньше 0.5 МПа, в случае прихода от системы диагностики аварийного сообщения сохраняется установленный режим (холодный или горячий резерв).

5. В стационарном режиме работы при приближении к помпажу первого цеха следует увеличить расход транспортируемого газа через второй цех, повысив мощность ГПА в нем. В результате расход газа через первый цех также повысится, а степень сжатия понизится (количество газа, отбираемое вторым цехом, будет больше, чем количество газа, выдаваемое первым цехом) и расстояние до границы помпажа агрегатов первого цеха возрастет.

6. В стационарном режиме работы при приближении к помпажу второго цеха следует увеличить расход газа через первый цех, повысив мощность ГПА. Аналогично предыдущему случаю возрастет расстояние до границы помпажа второго цеха.

7. При плановом увеличении расхода транспортируемого газа при приближении к помпажу первого цеха следует ускорить увеличение мощности ГПА второго цеха.

8. При плановом увеличении расхода транспортируемого газа при приближении к помпажу второго цеха следует ускорить увеличение мощности ГПА первого цеха.

9. При плановом уменьшении расхода транспортируемого газа при приближении к помпажу первого цеха следует замедлить уменьшение мощности ГПА второго цеха.

10. При плановом уменьшении расхода транспортируемого газа при приближении к помпажу второго цеха следует замедлить уменьшение мощности ГПА первого цеха.

Понятно, что это только малая часть правил, которые должны быть учтены в базе правил системы диагностики для всех уровней иерархии «КЦ–КС–ГПА». Задача данной статьи состоит в демонстрации принципов построения такой базы правил.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация процессов газовой промышленности / М. А. Балавин, С. П. Продровиков, А. З. Шайхутдинов, О. В. Назаров, В. Б. Яковлев, Я. А. Евдокимов, Н. С. Зотов, Ю. А. Кораблев; под общ. ред. Шайхутдинова А. З. М.: Наука; СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003 (СПб.: Акад. тип. Наука РАН).
2. Гаврилов А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
3. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под. ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. М.: Мир, 1993.
4. Глущенко П. В. Техническая диагностика. М.: Вузовская книга, 2004.
5. Isermann R. Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance. Berlin, Germany: Springer, 2006.
6. Isermann R. Fault diagnosis applications – Model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems. Berlin, Germany: Springer, 2011.
7. Ракитянская А. Б., Ротштейн А. П. Диагностика на основе нечетких отношений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 12. С. 113–130.

Yu. A. Korablev

Saint Petersburg Electrotechnical University

DEVELOPMENT OF A FUZZY FAULT-TOLERANT GAS TRANSPORT PROCESS CONTROL SYSTEM

The issues of organization of fuzzy fault-tolerant control of the gas transport process are considered. Relevance of development issues is related to the need to improve the safety of technological operations that ensure gas transportation. The main attention is paid to the development of algorithms for fuzzy diagnostics and ensuring fault tolerance of typical actuators (a two-position process crane that opens or closes the pipe, an AVO gas fan, an oil system pump). The article demonstrates the principles of building a database of rules for a fault-tolerant control system. The peculiarity of this framework is the decision rules in IF-parts of the diagnostic task, and THEN - and ELSE-parts of the rules depending on the diagnosis management can be realized in normal mode or provide fault-tolerance control in failure.

Fuzzy fault-tolerant control system, rule base, diagnostics, fault detection

УДК 681.326.74.06

Копкин Е. В., Попов Д. В., Мышко В. В.

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Квазиоптимальный алгоритм выбора многозначных диагностических признаков на основе учета ценности информации, получаемой в процессе анализа технического состояния объекта

В статье предложен достаточно простой в вычислительном отношении квазиоптимальный алгоритм построения гибкой программы анализа технического состояния объекта, позволяющий выбрать минимальную совокупность диагностических признаков, имеющих многозначную форму представления, проверка которых обеспечивает распознавание каждого из заданных технических состояний. Алгоритм строится на основе использования метода ветвей и границ. Сущность алгоритма заключается в том, что на каждом шаге ветвления программы выбор очередной проверки из числа возможных осуществляется таким образом, чтобы верхняя граница оптимизируемого показателя принимала максимальное значение. В качестве критерия оптимизации используется максимум верхней границы показателя ценности диагностической информации, получаемой в процессе распознавания технического состояния объекта при выполнении проверок диагностических признаков. Ценность диагностической информации определяется с помощью меры ценности информации, предложенной Р. Л. Стратоновичем. Приводится числовой пример реализации алгоритма.

Техническое состояние, диагностический признак, ценность диагностической информации

Создание автоматизированных систем, решающих задачи поддержки принятия решений о техническом состоянии (ТС) объекта, продиктовано необходимостью удовлетворения растущих