

## Информационная модель программного комплекса для проектирования систем технической диагностики сложных технологических процессов на основе метода разделения состояний

А. В. Вицентий, В. Н. Богатиков

*Институт Информатики и Математического Моделирования  
КНЦ РАН, Апатиты*

Проблемы технической диагностики, обеспечения безопасного функционирования и принятия решений по управлению химико-технологическими системами на данный момент находятся в стадии развития. В настоящее время трудно выделить какой-либо один доминирующий метод или подход к разработке систем диагностики. Ведется постоянный поиск новых и совершенствование существующих подходов и методов диагностики. При решении этих проблем возникает ряд дополнительных теоретических и практических подзадач требующих решения. Однако, можно сказать, что существует несколько основных направлений в области повышения безопасности технологических процессов. Это проектно-конструкторский подход, технологический подход, и подход, основанный на построении информационных систем технической диагностики.

Можно сказать, что подход, основанный на построении информационных систем, в настоящее время играет определяющую роль в создании систем обеспечения технологической безопасности. В основу таких систем могут быть заложены как уже разработанные и проверенные на практике методы диагностики, так и новые подходы, реализация которых без современных достижений в области программного и аппаратного обеспечения была бы затруднительна или вообще невозможна.

В данной работе рассматривается построение информационной модели программного комплекса для проектирования систем технической

диагностики сложных технологических процессов на основе метода разделения состояний. Основная задача этого программного комплекса — упростить и ускорить создание систем диагностики сложных химико-технологических систем (ХТС), основанных на методе разделения состояний и применении экспертных знаний.

На базе проведенных в работе исследований синтезирована обобщенная методика проектирования систем технической диагностики (СТД) технологических процессов для разработки СТД процессов функционирующих в условиях неполноты информации. Разработка такой методики проектирования является важным фактором для сокращения сроков проектирования СТД и улучшает конечное качество проекта. Также разработана обобщенная методика и программно-алгоритмическая модель формализации и визуализации знаний эксперта в рамках проектируемой системы. Разработаны архитектура и алгоритмы программного обеспечения технической диагностики технологических процессов (ТП), являющиеся неотъемлемой частью СТД. Созданы программные модули системы в виде независимых блоков, которые могут использоваться произвольно в процессе проектирования по требованию специалиста. Представленные в работе модели и алгоритмы были проверены на фрагментах тестовых данных, взятых с реальных технологических процессов (на примере кислотного отделения целлюлозно-картонного комбината (ЦКК)).

**Модель предметной области** в общем виде может быть представлена следующим образом:  $M = \langle O, R, S \rangle$ , где:  $O$  — множество объектов модели (технологической системы);  $R$  — множество связей между объектами;  $S$  — множество состояний объектов.

Множество  $O$  может быть представлено как:  $O = \langle O^a, O^{cy}, O^{tn} \rangle$ , где:  $O^a = \{o_i^a\}$ ,  $i = 1, \dots, I$  — множество объектов аппаратной части технологической системы (ТС);  $O^{cy} = \{o_j^{cy}\}$ ,  $j = 1, \dots, J$  — множество объектов системы управления ТС;  $O^{tn} = \{o_n^{tn}\}$ ,  $n = 1, \dots, N$  — множество объектов технологического процесса. В данной модели под объектом могут пониматься, как некоторые физические объекты (реактор, насос, датчик, регулятор, и т. д.), так и процессы, для которых необходимо осуществлять диагностику.

Множество связей между выделенными объектами —  $R$ , может быть представлено в виде:  $R = \langle R^y, R^b, R^{my}, R^{mb} \rangle$ , где:  $R^y = \{r_i^y\}$ ,  $i = 1, \dots, I$  — множество отношений между объектами одного уровня;  $R^b = \{r_j^b\}$ ,  $j = 1, \dots, J$  — множество отношений между объектами одной ветви;  $R^{my} = \{r_n^{my}\}$ ,  $n = 1, \dots, N$  — множество отношений между объектами разных уровней;  $R^{mb} = \{r_k^{mb}\}$ ,  $k = 1, \dots, K$  — множество отношений между объектами разных ветвей.

Множество состояний объектов —  $S = \langle S^a, S^{cy}, S^{тп} \rangle$ , где:  $S^a = \{s_i^a\}$ ,  $i = 1, \dots, I$  — множество состояний объектов аппаратной части технологической системы;  $S^{cy} = \{s_j^{cy}\}$ ,  $j = 1, \dots, J$  — множество состояний объектов системы управления технологической системы;  $S^{тп} = \{s_n^{тп}\}$ ,  $n = 1, \dots, N$  — множество состояний объектов технологического процесса.

Рассмотрим подход, используемый для диагностики состояний выделенных объектов. Создание системы технической диагностики ТП начинается с построения модели этого процесса. Упрощенно эту модель можно представить в виде:  $D = \langle S_{вх}^{тп}, S_{эт}^{тп}, Z^{неч}, U^{тп} \rangle$ , где:  $S_{вх}^{тп} = \{s_{вхi}^{тп}\}$ ,  $i = 1, \dots, I$  — множество всех возможных (выделенных экспертом) состояний объектов технологического процесса;  $S_{эт}^{тп} = \{s_{этj}^{тп}\}$ ,  $j = 1, \dots, J$  — множество эталонных состояний технологического процесса;  $Z^{неч} = \{z_n^{неч}\}$ ,  $n = 1, \dots, N$  — набор отношений между выделенными состояниями технологического процесса;  $U^{тп} = \{u^{тп}\}$ ,  $k = j, \dots, J$  — множество наборов возможных управлений, применимых в соответствующей ситуации из  $S_{эт}^{тп}$ .

Первым шагом алгоритма диагностики является формирование набора возможных ситуаций  $S_{вх}^{тп}$  на основании экспертного опроса. Такой набор ситуаций должен описывать все возможные ситуации, которые могут возникать в технологическом процессе и выделяться экспертом — технологом. Однако такой набор в большинстве случаев оказывается избыточным. Поэтому из него по разработанным алгоритмам [4, 5] выделяется набор эталонных ситуаций  $S_{эт}^{тп}$ , который полностью покрывает множество  $S_{вх}^{тп}$  при заданном пороге нечеткого равенства  $t$  (как правило,  $t \geq 0,6$ ). То есть, можно сказать, что формирование множества эталонных ситуаций можно представить в виде функции:  $S_{эт}^{тп} = f(S_{вх}^{тп}, Z^{неч}, \delta)$ , где  $\delta$  — порог нечеткого включения, а  $f$  — некоторая функция выбора ситуаций из  $S_{вх}^{тп}$ . Порог нечеткого включения ситуаций может быть определен отдельно для каждого технологического процесса и от его выбора зависит мощность множества эталонных ситуаций. Таким образом, при диагностике, можно осуществлять более точную или более быструю оценку о состоянии технологического процесса.

Следующим шагом является непосредственно оценка ситуации возникшей на конкретном производстве. Она может быть описана как:  $f(S_{вх}^{тп}, S_{эт}^{тп}, Z^{неч}, \delta)$ . То есть получаем вывод о том, что некоторая текущая ситуация, возникшая в технологическом процессе, является нечетко равной одной из эталонных ситуаций так, что их можно воспринимать как одну и ту же ситуацию, а значит, и использовать для текущей ситуации набор управлений из  $U^{тп}$ , заданный для эталонной. Диагностика состояний для аппаратной части и системы управления может осуществляться таким же образом, с той лишь разницей, что параметры рассмотренных

функций изменятся на параметры аппаратной части и параметры системы управления соответственно.

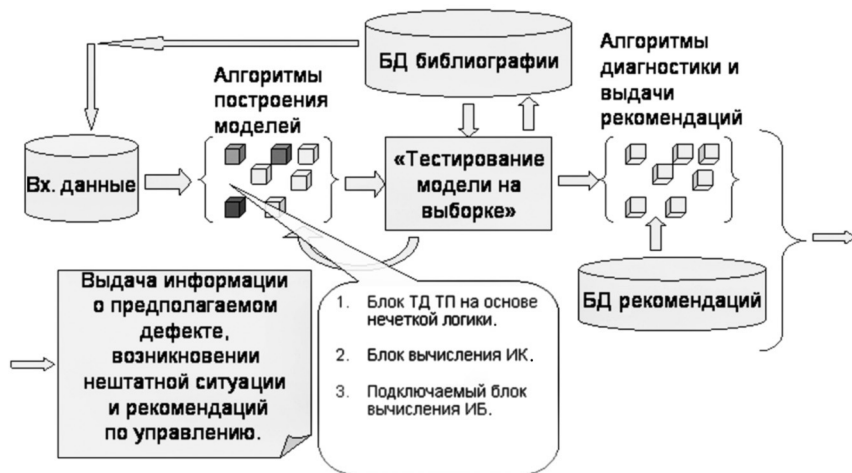
На первом этапе создания информационной модели (ИМ) программного комплекса для проектирования СТД сложных технологических процессов необходимо определить основные требования к системе и границы моделируемой предметной области, общий набор функций и сервисов, а так же разработать обобщенную модель системы с учетом ее детализации в процессе реализации системы.

В качестве основных сервисов, предоставляемых программным комплексом, были выделены:

- обращение к базам библиографии для получения необходимых статистических и справочных данных по ТП;
- построение исследовательской модели технологического процесса;
- проверка адекватности исследовательской модели и получение на ее основе интересующих пользователя параметров;
- построение дискретных моделей (по методу разделения состояний);
- исследование неопределенности системы (выделение диагностических параметров, сбор статистики по ним, исследование их влияния на ТП, построение функций распределения параметров и функций принадлежности параметров термам);
- построение дискретных моделей на основе теории нечетких множеств (нечеткая модель ТП);
- построение блока поддержки принятия решений;
- синтез СТД на базе блоков программного комплекса проектирования.

В общем виде работа пользователя в такой системе может быть проиллюстрирована рис.1. На первом шаге пользователю (инженеру-технологу) программного комплекса для проектирования СТД предоставляется возможность работы с библиографией. При этом пользователь имеет возможность подобрать всю необходимую ему информацию по автоматизируемому ТП: описание самого процесса, описание протекающих в аппаратах реакций с указанием необходимых формул и уравнений для облегчения последующего составления дискретных моделей, необходимые документы по безопасности и штатным режимам работы, документы, относящиеся непосредственно к проектированию; и др. Такая база данных по технологическому процессу позволит в дальнейшем оперативно находить требуемую информацию, осуществлять поиск по ней и делать выборку необходимых документов.

На втором шаге осуществляется построение «исследовательских моделей» (т. е. моделей, не «откалиброванных» на наборах исходных данных) автоматизируемого ТП для их последующего исследования, диагностики



**Рис. 1.** Общий вид программного комплекса для проектирования систем технической диагностики сложных технологических процессов на основе метода разделения состояний

и выдачи рекомендаций по управлению. На этапе построения моделей можно выбрать их тип: аналитические, вероятностные, стохастические, и другие типы представления моделей. Количество методов представления моделей зависит от наполнения базы алгоритмов и программ построения модели, заложенных в систему, и может меняться в зависимости от конкретного ТП или предприятия, на котором используется программный комплекс проектирования. В зависимости от выбора типа модели, предлагается определенный набор подпрограмм и математических методов (блоков системы) а также методов ввода и обработки данных.

После создания модели ТП из предлагаемых программным комплексом блоков и ввода исходных данных (вручную или из базы данных) пользователю предлагается проверить полученную «исследовательскую модель» на выборке данных из библиографии. Если полученные по модели результаты адекватно представляют состояния реального ТП, то такую модель можно считать «диагностической моделью» и использовать при дальнейшей диагностике ТП. В случае выявления неадекватности модели или ошибок в ней, необходимо провести ее повторное построение, выбрав другой тип модели и набор подпрограмм и математических методов из базы алгоритмов и программ построения модели.

Создав «диагностическую модель» ТП можно ее использовать для обнаружения нештатных ситуаций, расчета появления постепенных и вне-

запных отказов и выдачи рекомендаций по управлению (из базы данных рекомендаций).

Одной из основных составляющих программного комплекса для проектирования систем технической диагностики сложных технологических процессов на основе метода разделения состояний — базы алгоритмов и программ для построения моделей — является набор подпрограмм осуществляющих построение нечеткой модели технологического процесса. Эти подпрограммы основаны на использовании метода разделения состояний и применении математического аппарата нечеткой логики и реализуют следующие функции:

- построение дискретной модели технологического процесса и работа с ней;
- определение возможных нечетких ситуаций в технологическом процессе;
- построение набора эталонных ситуаций;
- вычисление нечеткого равенства текущих ситуаций ТП и эталонных ситуаций;
- выдача информации блоком принятия решений по управлению объектом.

Рассмотрим подробнее алгоритмы построения нечеткой модели ТП, представив их в виде диаграмм деятельности (activity diagram), описывающих логику работы алгоритмов, отображающих связи и переходы между блоками, а так же выполняемые в этих блоках операции.

При проектировании СТД возникает необходимость не только представить процесс изменения состояний ТП, но и детализировать особенности алгоритмической и логической реализации выполняемых системой операций. Для моделирования процесса выполнения операций был выбран язык моделирования UML и диаграммы деятельности. Применяемая в них графическая нотация подобна нотации диаграмм состояний, поскольку на диаграммах деятельности также присутствуют обозначения состояний и переходов. Отличие заключается в семантике состояний, которые используются для представления не деятельностей, а действий, и в отсутствии на переходах сигнатуры событий. Каждое состояние на диаграмме деятельности соответствует выполнению некоторой элементарной операции, а переход в следующее состояние происходит только при завершении этой операции в предыдущем состоянии. Графически диаграмма деятельности представляется в форме графа деятельности, вершинами которого являются состояния действия, а дугами — переходы от одного состояния действия к другому.

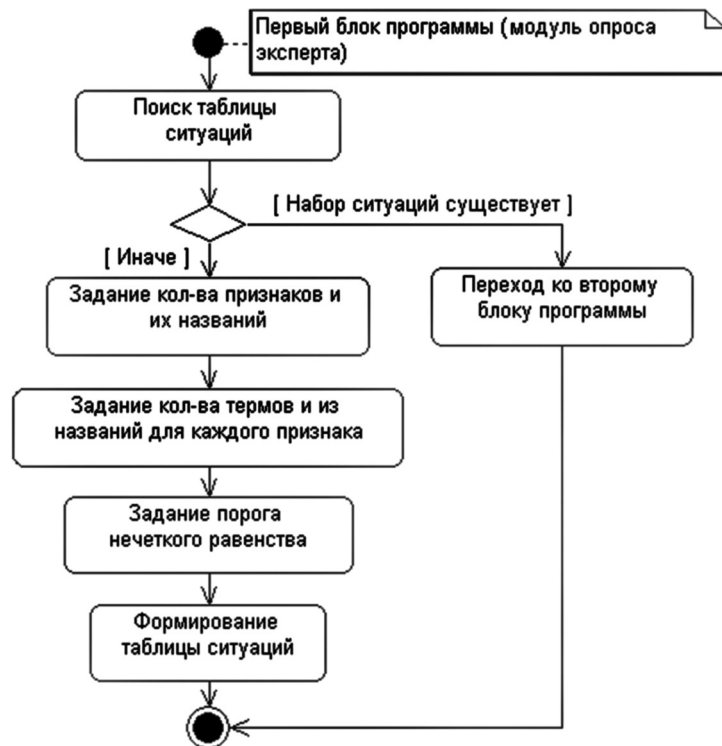


Рис. 2. Модуль опроса эксперта

Таким образом, диаграммы деятельности можно считать частным случаем диаграмм состояний. Они позволяют реализовать в языке UML особенности процедурного и синхронного управления, обусловленного завершением внутренних деятельностей и действий. Мета модель UML предоставляет для этого необходимые термины и семантику. Основным направлением использования диаграмм деятельности является визуализация особенностей реализации операций классов, когда необходимо представить алгоритмы их выполнения. При этом каждое состояние может являться выполнением операции некоторого класса либо ее части, позволяя использовать диаграммы деятельности для описания реакций на внутренние события системы.

В контексте языка UML деятельность (activity) представляет собой некоторую совокупность отдельных вычислений, выполняемых автома-

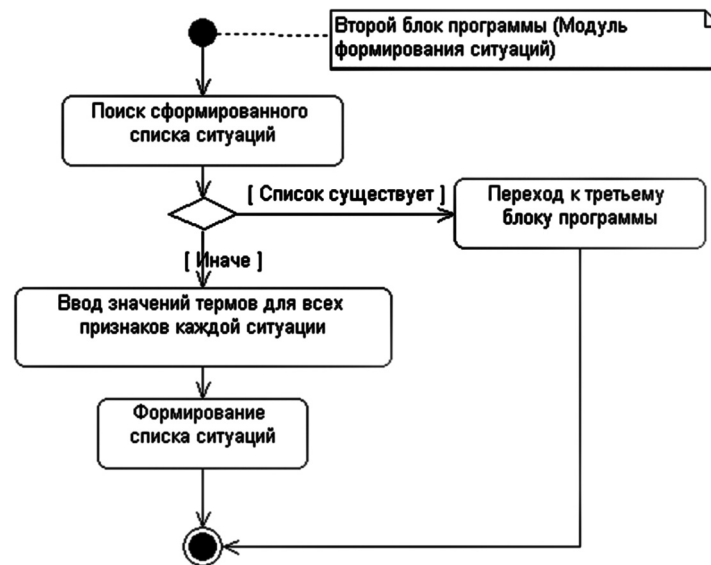


Рис. 3. Модуль формирования ситуаций

том. При этом отдельные элементарные вычисления могут приводить к некоторому результату или действию (action). На диаграмме деятельности отображается логика или последовательность перехода от одной деятельности к другой, при этом внимание фиксируется на результате деятельности. Сам же результат может привести к изменению состояния системы или возвращению некоторого значения. Таким образом, логика работы программы диагностики состояний может быть отображена в виде информационной модели, представленной диаграммами деятельности в нотации UML.

Первой задачей при построении нечеткой (дискретной) модели ТП является декомпозиция системы с целью выделения основных диагностических параметров, использующихся в модели. На этом этапе необходимо определить оцениваемые признаки ТП (например, температура, концентрация, давление) и задать термы для каждого из них (например, низкая, нормальная, высокая, очень высокая). Так же, на этом шаге задается порог нечеткого равенства, основываясь на котором, в последствии будет делаться вывод о нечетком равенстве входных и эталонных ситуаций. Для получения этих данных используется экспертный опрос. Диаграмма деятельности, иллюстрирующая этот процесс, приведена на рис. 2.

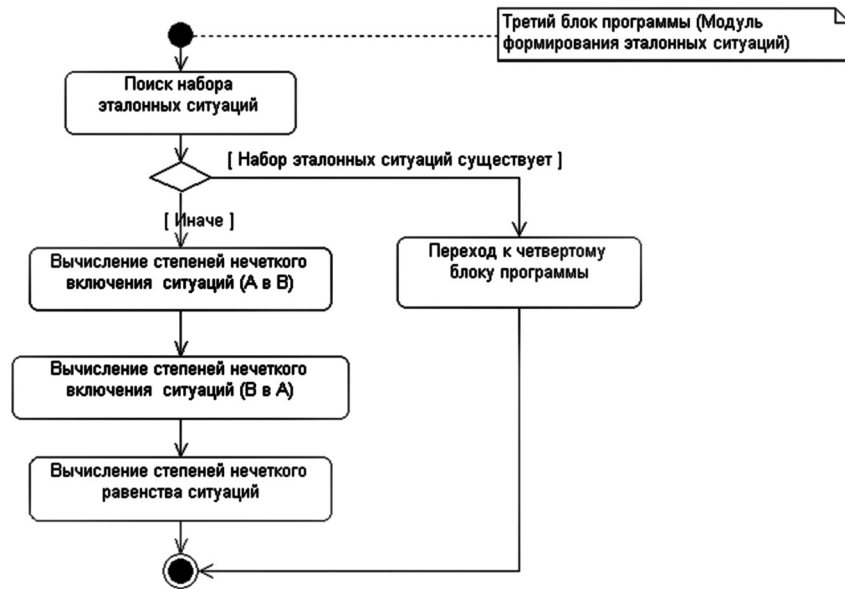


Рис. 4. Модуль формирования эталонных ситуаций

После выявления всех оцениваемых признаков ТП и их термов необходимо произвести построение набора нечетких ситуаций, которые могут возникнуть в технологическом процессе. Алгоритм построение этого набора приведен на рис. 3 в виде диаграммы деятельности.

Имея набор возможных нечетких ситуаций ТП можно выделить на нем набор нечетких эталонных ситуаций путем исключения нечетко равных ситуаций. Набор нечетких эталонных ситуаций должен полно описывать все возможные нечеткие ситуации ТП при заданном пороге нечеткого равенства (рис. 4). Процедура выделения набора нечетких эталонных ситуаций основана на вычислении степени нечеткого включения и степени нечеткого равенства нечетких ситуаций [6, 7].

Построенный таким образом набор нечетких эталонных ситуаций является основным элементом для процесса диагностики по нечеткой модели ТП. В общем виде, процесс диагностики можно представить следующим образом. С объекта диагностики снимаются данные о состоянии выделенных диагностических параметров в соответствии с набором признаков ТП и их термов установленных экспертным опросом. На основе этих данных формируется текущая (входная) нечеткая ситуация, описывающая состояние ТП в данный момент времени. По разработанным

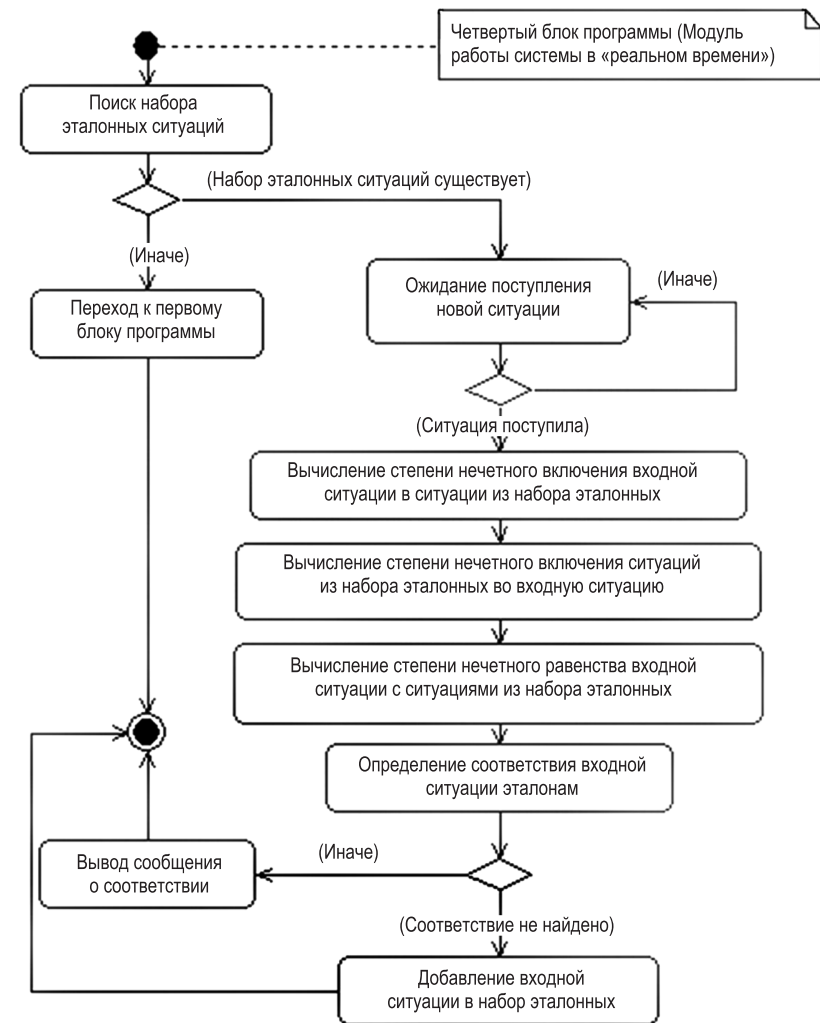


Рис. 5. Работа в режиме диагностики

подпрограмм из блока алгоритмов программного комплекса для проектирования систем технической диагностики сложных технологических процессов на основе метода разделения состояний вычисляются показатели нечеткого включения текущей нечеткой ситуации во все ситуации

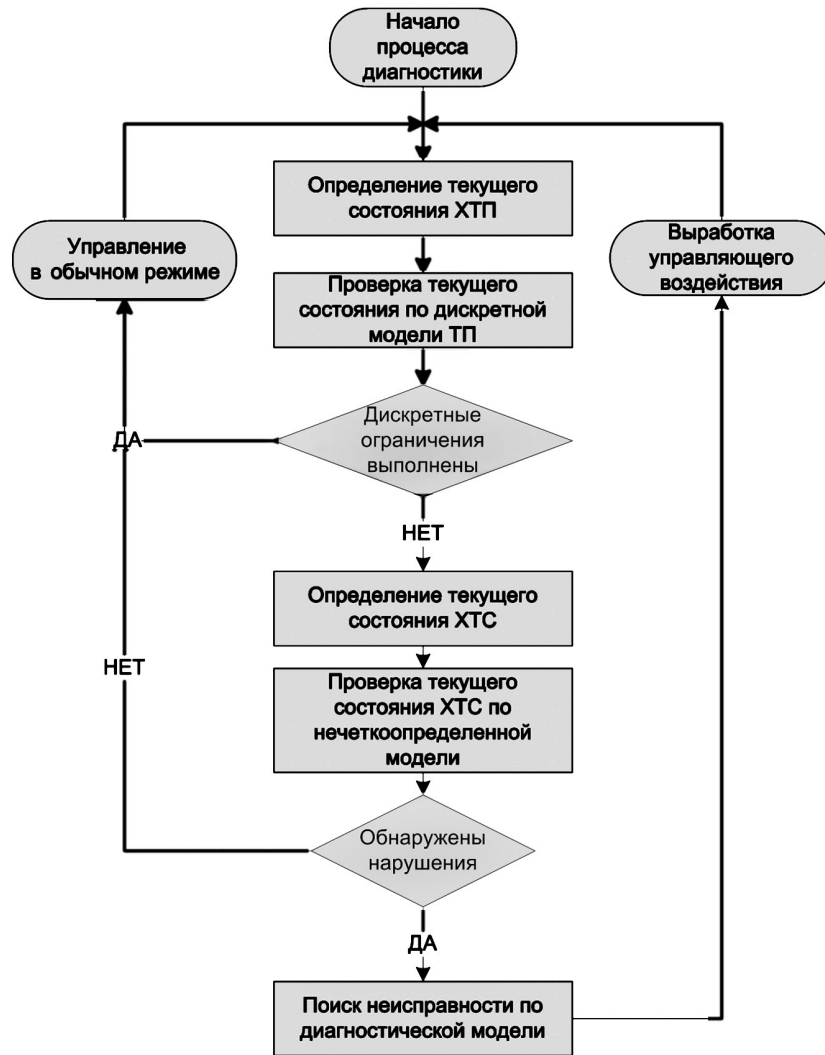


Рис. 6. Обобщенная блок-схема алгоритма двухуровневой системы диагностики

из набора нечетких эталонных ситуаций и нечеткого включения всех нечетких эталонных ситуаций во входную нечеткую ситуацию. Далее рассчитывается степень нечеткого равенства ( $t$ ) между входной нечеткой ситуацией и нечеткими ситуациями из набора нечетких эталонных си-

туаций. Ситуация из набора нечетких эталонных ситуаций, для которой степень нечеткого равенства ( $t$ ) с текущей ситуацией будет максимальной и большей 0,6 ( $t \geq 0,6$  — определяется для конкретного ТП), будет считаться эквивалентной текущей нечеткой ситуации. В этом случае для текущей нечеткой ситуации могут быть применены те же рекомендации и управляющие воздействия, что и для нечеткой эталонной ситуации. Если в наборе нечетких эталонных ситуаций не нашлось ни одной ситуации, для которой степень нечеткого равенства  $t \geq 0,6$ , то считается, что набор нечетких эталонных ситуаций плохо построен и не покрывает полностью набор всех возможных ситуаций ТП. В этом случае пользователь программного комплекса для проектирования систем технической диагностики сложных технологических процессов на основе метода разделения состояний может перестроить существующий набор нечетких эталонных ситуаций по имеющимся алгоритмам или дополнить его текущей нечеткой ситуацией, определив соответствующие рекомендации по ведению ТП и управления, и занеся их в базы программного комплекса. В виде диаграммы деятельности процесс диагностики представлен на рис. 5.

Кроме рассмотренных алгоритмов и программ в программный комплекс для проектирования систем технической диагностики сложных технологических процессов на основе метода разделения состояний входят и другие подпрограммы необходимые для построения СТД ТП. Наиболее важными среди них можно считать набор подпрограмм для вычисления интегрального критерия безопасности, индекса и центра безопасности [8–10]. Рассмотренный в работе программный комплекс имеет открытую архитектуру и может быть так же дополнен необходимыми подпрограммами для конкретного технологического процесса.

Для построения СТД ТП получения сернистой кислоты программный комплекс был дополнен необходимыми дискретными моделями этого технологического процесса. В настоящее время, с его помощью разработана двухуровневая система диагностики, основанная на дискретных (первый уровень) и нечетко определенных (второй уровень) моделях технологического процесса [1–3]. Обобщенная блок-схема работы двухуровневой системы диагностики ХТС представлена на рис. 6. Для реализации первого уровня диагностики были разработаны дискретные модели процесса плавления серы при помощи пара, процесса получения сернистого газа путем сжигания расплавленной серы, двухступенчатого процесса очистки и охлаждения сернистого газа в скрубберах и операции приготовления сырой сульфитной кислоты в абсорбционной колонне. Все эти процессы являются подпроцессами получения сернистой кислоты в кислотном отделении ЦКК. Для каждого из этих процессов были выделены основные входные и выходные параметры, и описан вывод дискретных моделей

и ограничений, которые используются при дальнейшей оценке состояний для целей диагностики ХТП.

## Литература

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
2. Тоичкин Н. А., Богатиков В. Н. Построение модели управления технологической безопасностью на основе бинарных отношений // Информационные технологии в региональном развитии. Апатиты, 2004. Вып. IV. С. 64–73.
3. Тоичкин Н. А., Богатиков В. Н. Алгоритм определения центра безопасности для оценки состояния технологического процесса // Информационные технологии в региональном развитии. Апатиты, 2005. Вып. V. С. 68–72.
4. Вицентий А. В. Постановка задачи управления рисками непрерывных химико-технологических процессов как задачи оптимизации // Тоичкин Н. А., Охота С. В., Богатиков В. Н. Управление безопасностью природно-промышленных систем / Под ред. Путилова В. А. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. Вып. VI. 70 с.
5. Вицентий А. В. Информационные модели на основе CASE-средств промышленных объектов для информационной поддержки принятия решений // Вицентий А. В., Богатиков В. Н., Вент Д. П., Палюх Б. В. Международный научнотехническое приложение «Программные продукты и системы» к междунар. журн. «Проблемы теории и практики управления». 2003. № 4. С. 29–34.
6. Вицентий А. В. Алгоритмы оценки состояний в задачах управления технологической безопасностью // Охота С. В., Датьев И. О., Богатиков В. Н. Управление безопасностью природно-промышленных систем. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003. Выпуск IV. С. 55–61.
7. Богатиков В. Н., Проектирование информационного обеспечения задач управления безопасностью технологических процессов // Вицентий А. В., Охота С. В., Палюх Б. В. Информационные ресурсы России. М.: Информационные ресурсы России, 2004. № 3(79). С. 5–8.
8. Вицентий А. В. Разработка метода оценки состояний технологических процессов и систем на основе нечетко определенных моделей. XIV-я Международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Сборник трудов. М.: ИПУ, 2006. С. 477–479.
9. Тоичкин Н. А., Мартыненко И. Б. Метод оценки безопасности технологических процессов на основе индекса безопасности // Труды Новомосковского института Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева. Серия: Кибернетика, Автоматизация, Математика, Информатизация. Новомосковск, 2004. С. 244–247.
10. Тоичкин Н. А., Богатиков В. Н. Определение индекса безопасности технологического процесса для целей управления безопасностью // Информационные технологии в региональном развитии. Апатиты, 2005. Вып. V. С. 73–75.

## Исследование эксплуатационных режимов промышленных процессов для целей построения области безопасного функционирования

А. В. Вицентий, В. В. Саяпин

*Институт Информатики и Математического Моделирования  
КНЦ РАН, Апатиты*

Возникновение отказов и разного рода нештатных ситуаций на современных крупных производствах характеризуется высокой стоимостью и риском развития аварий, которые могут привести к значительным материальным потерям, нанесению ущерба окружающей среде и обслуживающему персоналу. В настоящее время различают несколько видов мероприятий по повышению безопасности работы технологических систем — мероприятия, организуемые на этапе проектирования, и мероприятия, организуемые в процессе производства и эксплуатации.

Задача диагностики и выработки управляющих воздействий для удержания процесса в области безопасных состояний особенно актуальна для процессов с непрерывным характером производства, так как возникновение нештатных ситуаций в таких процессах наиболее сильно влияет на экономические показатели всего производства. Данная работа посвящена исследованию и разработке средств и методов повышения безопасности сложных химико-технологических систем (ХТС) на этапе их эксплуатации. В качестве примера сложной ХТС в данной работе рассматривается кислотное отделение по получению сернистой кислоты целлюлозно-картонного комбината (ЦКК).

На сегодняшний день трудно выделить единый, универсальный метод создания систем диагностики. Наиболее распространенными подходами в создании диагностических систем можно назвать: подход, основанный на количественных моделях и подход, позволяющий комбинировать