

2 Обобщенная характеристика математических моделей, используемые в задачах диагностики технологических систем

Диагностика неполадок в производственных процессах с использованием статистических и эвристических подходов достаточно успешно применяется для близких к регламентным стационарным случаев. Формализованный подход к проблемам создания систем предотвращения развития потенциально опасных ситуаций зарекомендовал себя положительно на ряде предприятий [4].

Специфика диагностики состояний в химической технологии состоит в том, что диагностирование осуществляется в режиме рабочего функционирования без подачи на вход каких-либо тестовых или других воздействий. Более того, многие параметры объекта, важные для оценки его текущего состояния, не могут быть непосредственно измерены. Поэтому необходимым условием для построения системы автоматического обнаружения и идентификации неисправностей является наличие математической модели, обеспечивающей восполнение недостающей информации о диагностируемом объекте. Основными требованиями, предъявляемыми к моделям, является их достаточность для решения поставленных задач и удобство в использовании (практическая целесообразность). Модели, используемые в системах диагностирования, можно разделить на три группы [5]: логические, причинно-следственные и аналитические. Эти три типа моделей не являются альтернативными. Они могут быть использованы совместно, что наиболее целесообразно при диагностировании сложных ХТС.

Для описания поведения объектов, диагностирование которых осуществляется посредством анализа допусков, применяются математические модели логического типа [6]. Нахождение параметра в допустимых пределах можно классифицировать как "1", а выход из заданной области - как "0". Подобным образом преобразуются как входные, так и выходные переменные объекта. Задача диагностирования непрерывных объектов может быть сведена к задаче диагностирования дискретных объектов, параметры которых могут характеризоваться логическими значениями ("ИСТИНА"- "ЛОЖЬ"). При таком подходе появляется возможность использования глубоко изученных и достаточно давно применяемых на практике методов диагностирования цифровых схем [7, 8].

Объект диагностирования в этом случае представляется в виде блоков P_i , каждый из которых имеет вектор внешних входов x_i и вектор входов y_i , являющимися выходами предыдущих блоков объекта, а также вектор выходных сигналов z_i , часть из которых может быть входами последующих блоков. Входы и выходы представляются множеством измеряемых параметров (контрольных точек) и полагается, что каждый из этих параметров может принимать лишь два значения - "в допуске", "не в допуске". По выходу z_{ij} составляется булева функция F_{ij} , которую можно записать в виде совершенной нормальной дизъюнктивной формы и затем минимизировать ее методами алгебры логики. На основе F_{ij} строится таблица неисправностей [9]. Логическая модель, заданная в виде таблицы неисправностей, позволяет с помощью специальных процедур нахождения минимального покрытия этой таблицы системой столбцов выбирать минимальное число контрольных точек для обеспечения различимости одиночных и кратных дефектов [10, 11] или, наоборот, доопределять минимальное множество точек контроля для возможного диагностирования неисправностей произвольной кратности [12].

В задачах диагностирования объектов химической технологии, как правило, используют не двух-, а трехзначное представление результатов измерений:

- +(плюс)-отклонение от области допустимых значений в сторону увеличения;
- 0(ноль)-нормальное значение контролируемого параметра;
- -(минус)-отклонение от области допустимых значений в сторону уменьшения.

Количество состояний таблицы неисправностей при этом составляет 3^n , где n - число контролируемых параметров. Число состояний может быть уменьшено за счет использования не только формальных, но также и эвристических приемов, то есть использовать имеющийся опыт и правдоподобные рассуждения [13, 14].

В настоящее время логические модели, заданные в виде таблиц неисправностей, имеют ограниченное применение, так как диагностируемые объекты, как правило, характеризуются большим числом параметров. Кроме того, при наличии обратных связей применение логических методов затруднительно. Но для диагностирования сравнительно несложных объектов логические

модели в виде таблиц неисправностей, как наиболее простые, по-видимому, сохраняют свое значение.

Таблицы решений [15] являются более универсальными по сравнению с простейшими таблицами неисправностей, составленными по классификации "в допуске - не в допуске". Состояние контролируемой переменной может рассматриваться в терминах не двух - трехзначной логики, а с любой произвольной градацией. Кроме того, для отражения динамики поведения объекта возможно также разграничение переменных состояния по времени. Это значительно усложняет форму представления объекта диагностирования, однако, по мнению авторов [16], такое расширение функциональных возможностей значительно увеличит также сферу применения этих моделей.

С широким внедрением в практику диагностирования современных информационных технологий, использующих методы искусственного интеллекта, особое значение приобретает построение логико-лингвистических диагностических моделей [17] и применение небулевых логик [18]. Примерами использования аппарата нечеткой логики для диагностирования химико-технологических объектов могут служить работы [19, 20].

Наиболее распространенными видами причинно-следственных моделей являются помеченные направленные графы (ПНГ), деревья отказов (ДО) и деревья событий (ДС). Общим для причинно-следственных моделей является представление объекта в виде графа.

Каждый узел ПНГ ассоциируется с какой-либо переменной состояния объекта. Все текущие изменения переменных состояния учитываются не количественно, а качественно - посредством трехзначной логики в базе значений «+», «0», и «-». Дуга ПНГ, соединяющая два соседних узла, указывает причинно-следственную связь между ними. Если изменение состояния исходного узла дуги вызывает такое же изменение конечного узла (такое же изменение знака), то дуга помечается знаком «+». Если же характер этого изменения обратный, то дуга помечается знаком «-». Иногда для отражения скорости изменений вводят весовые коэффициенты. Известны также примеры введения в ПНГ фактора времени для отражения поведения объекта в динамике, учета задержек и т.п. [21, 22, 23]. Это довольно важное дополнение, расширяющее информационные возможности ПНГ, но в то же время и существенно усложняющее его обработку. В работе [24] дополнительно введены также вероятности перехода из одного состояния в другое. Выбор той или иной модификации ПНГ зависит от особенностей решаемой задачи. Алгоритм выделения сильноедействующей, единственной по предположению, компоненты ПНГ был предложен в работе [25] и затем получил свое дальнейшее развитие в работе [26].

Необходимо иметь в виду, что диагностирование по ПНГ корректно только в том случае, если переменные состояния во время поиска дефекта изменяются лишь единожды, вследствие возникшего нарушения [27]. В тех случаях, когда такое ограничение не позволяет решать поставленные задачи, используют различные модификации ПНГ - вводят фактор времени или учитывают множественность состояний ПНГ [28]. Повышение быстродействия возможно путем преобразования ПНГ в расширенное множество логических правил, обеспечивающих формирование четких инструкций. Для химических производств число таких правил может составлять десятки тысяч [29]. Это, в основном, связано с тем, что причинно-следственные модели из-за своего качественного характера неоднозначны и определяют целое множество возможных логических правил.

Для решения сложных задач, когда последовательность событий, происходящих при возникновении неисправности, зависит от множества условий и заранее не может быть определена однозначно, а также в тех случаях, когда необходимо учитывать динамику поведения объекта, представляется целесообразным использование сетей Петри и различных их модификаций. Известны примеры, когда сети Петри используются для анализа связанных деревьев отказов [30], но они могут быть использованы и самостоятельно для решения сложных диагностических задач [31, 32, 33, 34, 35]. Сети Петри также являются помеченными направленными графами, однако, в отличие от ПНГ, они используют элементы пороговой логики и их метки являются динамическими.

В последнее время заметно возросло число публикаций по использованию в задачах диагностики пороговых логических графов - нейронных сетей. Отличительной особенностью нейронных сетей является их адаптивность. Они могут быть использованы в тех случаях, когда неизвестна корреляция между переменными процесса. Вопросам практического применения нейронных сетей для диагностирования процессов химической технологии посвящены работы [36,

37, 37, 39, 40, 41].

Наиболее распространенную группу причинно-следственных моделей составляют "деревья отказов" (ДО), которым посвящена достаточно обширная библиография [16, 42, 43, 44]. Из обзорных работ следует отметить [45, 46]. Основные ограничения и затруднения, присущие методу диагностирования с помощью ДО, обсуждаются в работах [47, 48]. Учет неопределенности во входных данных и множественность состояний рассматриваются в работах [49, 50, 51, 52, 53].

Если исходным является возникший или возможный дефект, и причинно-следственные связи устанавливаются с целью определения последовательности следующих за этим дефектом событий, то говорят о дереве событий (ДС). Разновидностью ДС является дерево решений. В ДС рабочие состояния не рассматриваются, так что суммарная вероятность всех событий, представленных в ДС, не равна единице. В дереве решений через состояния его элементов учитываются все возможные состояния объекта диагностирования, в том числе и исправные [16]. ДС позволяет проанализировать и систематизировать информацию о возможных неисправностях, об условиях, ускоряющих их развитие и повышающих частоту их появления. Это позволяет не только оперативно действовать в критической ситуации, но также и правильно организовать необходимые профилактические меры по ее предупреждению [55].

В последнее время широкое распространение получила методика HAZOR (hazard and operability study - "опасность и изучение действенности") [56]. Эта методика заключается в комплексном изучении отклонений технологических параметров от номинальных значений, а в качестве исходного дефекта рассматривается не отказ, а повреждение. При этом для каждого рассматриваемого отклонения режимных параметров последовательно изучаются как возможные причины, так и возможные последствия [57].

Существенным недостатком причинно-следственных моделей является то, что для их построения необходим подробнейший разбор всех возможных ситуаций. Однако, как показывает практика [58], наиболее тяжелые последствия обусловлены возникновением наименее вероятных событий.

Метод пространства состояний следует рассматривать как достаточно общую методологию, позволяющую решать очень широкий спектр задач. Модель в пространстве состояний является наиболее полной и наиболее универсальной. Она легко может быть расширена для решения специальных задач или же может быть сведена к какому-либо другому виду моделей. Так, например, в монографии [59] пространство состояний непрерывной динамической системы представляется в виде направленного причинно-следственного графа. Известны также примеры преобразования дерева отказов в эквивалентные диаграммы пространства состояний [60]. Однако наибольший интерес представляют алгоритмы перехода от передаточных функций к модели в пространстве состояний и наоборот, поскольку одни методы анализа и синтеза систем проще реализуются во временной области, а другие - в частотной.

Представляют интерес методы диагностирования непосредственно по модели, заданной в виде дифференциальных уравнений. Переход в аварийное состояние связан со структурными изменениями модели. В работе [61] предлагается так называемый эволюционный подход, при котором диагностирование состояния системы проводится на основе вычисления функционала энергии и энтропии. Другие, более традиционные, подходы данного направления используют для качественного анализа динамической системы методы теории катастроф [62, 63, 64]. Теория катастроф позволяет определять закон управления, обеспечивающий оптимальное поведение объекта в точках бифуркации.

Структурные методы анализа с помощью передаточных функций рассмотрены в работах [65, 66, 67, 68, 69]. К аналитическим моделям относятся также модели, которые для диагностирования дефектов используют многочисленные методы теории идентификации, распознавания образов, теории чувствительности [5] и др.

Под параметрической диагностикой понимается метод обнаружения и диагностики неполадок с помощью оценок переменных состояния и параметров модели [42, 4, 70, 71]. Обычно [72] задача параметрической диагностики решается путем оперативного вычисления диагностических переменных через измеренные мгновенные значения косвенных технологических переменных. Метод параметрической диагностики, построенный на основе применения интервального анализа, позволяет снизить чувствительность к шумовым помехам [4].

На основе свойств непрерывных технологических операторов можно построить дискретные автоматные модели [73, 74]. В [75] предложен метод разделения состояний, базирующийся на том,

что для линейных технологических операторов можно получить системы линейных ограничений, выделяющие в области элемента алфавита входа области, соотносящихся с некоторой областью элемента алфавита состояний. Ограничения играют важную роль для организации контроля технологических процессов, на основе которых осуществляется классификация состояний ХТС. Кроме того, эти соотношения позволяют прогнозировать возникновение постепенных отказов, являющихся результатом изменения свойств веществ участвующих в ХТП или свойств аппаратов, которые приводят к нарушению ограничений и тем самым указывают на появление неполадок в технологической системе.

Использование нечетких множеств для моделирования ХТП и управления их безопасным функционированием основывается на том, что представление о состоянии объекта является размытым, и не существует четкой границы между переходами из состояния в состояние. При этом состояние объекта диагностирования оценивается также по значениям переменных состояния, описывающих данный объект. Но определение состояния объекта управления осуществляется на основе применения оценки, которая интерпретируется как степень нечеткого равенства текущего состояния некоторому эталонному состоянию. Каждый элемент алфавита состояний определяется заданием значений функций принадлежности переменных состояния, типичных для данного элемента алфавита, которые можно назвать эталонными для данного элемента алфавита состояний **A**. Для задания нечеткого множества эталонных состояний используются ограничения, на основе которых, формируется множество **A**.