



ВВЕДЕНИЕ

Как помнят внимательные читатели, объявленная в этом году тема "Имитационное моделирование (ИМ) для промышленной автоматизации" вызвала невиданную ранее активность авторов. Как и было анонсировано, редакция продолжает публикацию работ, не вошедших в №7 журнала "Автоматизация в промышленности" за 2010 г.

В дополнение к опубликованной в журнале №9 статье С.С. Власова и А.Г. Шумихина, посвященной разработке и имитационному исследованию алгоритмов управления на основе нечеткой логики, в настоящей подборке представлены еще две работы, в которых ИМ применяется как средство анализа систем нечеткого управления и управления по базам правил — статьи авт. В.М. Шпакова и П.Г. Полько и др.

Далее в номере представлены работы, посвященные использованию ИМ для инжиниринга систем управления разнообразными ТП: У.Ю. Коробейникова и др. (производство метанола); М.В. Зенькович и Ю.Г. Древш (литейное производство).

Следующие две работы посвящены инжинирингу разработки управляющих алгоритмов ПЛК — статьи авт. В.Е. Зюбина и компании V&R Industrial Automation. Статья авт. С.М. Салибекян и П.Б. Панфилов описывает инжиниринг распределенных систем автоматизации.

Наконец, особняком стоит работа авт. Н.Ю. Макаровой и др., рассматривающая анализ механизмов механолюминесцентного преобразования.

Редакция благодарит авторов и надеется на еще большую их активность в следующем году, где традиционный для данного направления седьмой номер планируется посвятить инструментальным и методическим средствам подготовки оперативного персонала промышленных предприятий.

Редакция выражает благодарность за помощь в подготовке номера Виктору Михайловичу Дозорцеву — д-ру техн. наук, проф., члену редакционной коллегии журнала "Автоматизация в промышленности".

Подход к разработке и использованию ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК

В.М. Шпаков (СПИИРАН)

Описывается подход к разработке моделей промышленных установок, основанный на использовании знаний о развитии процессов, формализованных с помощью базы правил трансформации состояний взаимодействующих процессов. Предлагаются структуры правил, обеспечивающие интуитивно понятный ситуационный способ представления знаний. Обсуждаются пути программной реализации моделей. Подход может быть использован для разработки моделей промышленных установок с помощью универсальных средств программирования, а также служить основой для разработки компьютерных средств, ориентированных на моделирование работы таких установок. Приводится пример использования предложенного подхода для моделирования режимов работы автоматизированной установки по производству жидкого гелия.

Ключевые слова: имитационное моделирование, формализация знаний, базы правил, динамические экспертные системы, логическое программирование, теория управления.

Введение

В настоящей работе рассматриваются промышленные установки, реализующие дискретно-непрерывные ТП. Они находят применение в химической, пищевой, газовой, металлургической и других отраслях. Особенностью таких установок является большое число взаимодействующих единиц оборудования и взаимозависимых параметров. Наглядное представление о них дает приведенная на рис. 1 мнемосхема модели установки ОГ-100 по производству жидкого гелия. На схеме представлено основное оборудование и арматура (два турбодетандера, компрессоры, ресивер, газгольдер, теплообменники, емкости, дроссель, вентили и клапаны). Указаны текущие значения давлений, температур и уровней. Приведенные на схеме обозначения и наименования соответствуют использованному в описании установки ОГ-100. Система содержит 14 контуров автоматического регулирования. Модель разработана на основе

описываемого подхода, более подробно она будет рассмотрена ниже.

Имитационная модель установки может быть эффективно использована на различных этапах ее жизненного цикла. Имитационная модель прототипа установки полезна уже на стадии согласования технического задания. Она позволяет обеспечить полноту и непротиворечивость требований, а также однозначное и одинаковое их понимание. При проектировании модель позволяет эффективно решать задачи координации работы оборудования, формирования стратегии управления и выбора параметров средств управления. На этапе эксплуатации модель установки может использоваться для диагностики отказов, возникновении нештатных ситуаций. Имитационные модели оборудования установок используются для тестирования их систем управления.

В настоящее время на рынке имеется большое число различных компьютерных средств разработки

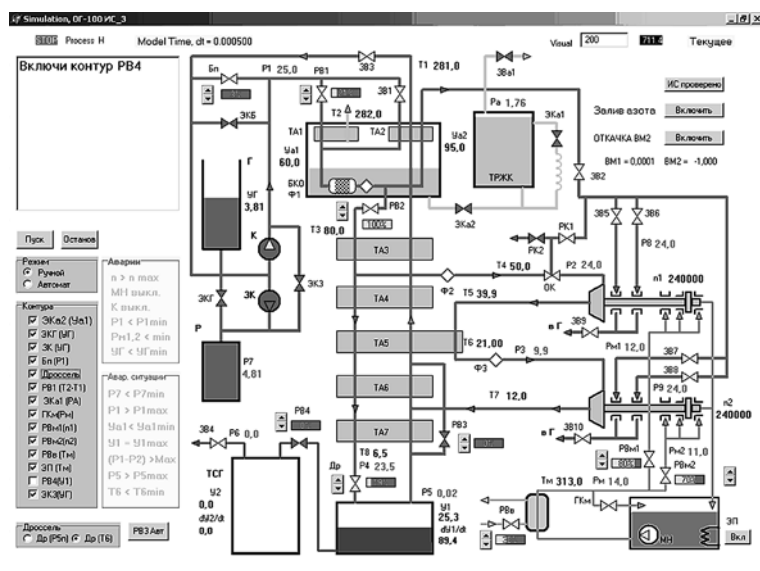


Рис. 1. Мнемосхема модели установки по производству жидкого геля

имитационных моделей динамических систем [1,2]. Некоторые из них являются универсальными (Simulink, OmSim), большинство же направлено на определенные предметные и проблемные области. При этом методы спецификации систем в основном ориентированы на специалистов по динамике процессов (термодинамике, газодинамике и др.) и автоматическому управлению. В случае же моделирования установок необходимо использовать экспертные знания технологов. Из имеющихся средств очень хорошо подходит для моделирования промышленных установок динамическая экспертная система G2 американской фирмы Gensym [3]. Эта система предназначена, в первую очередь, для разработки и реализации систем управления такими объектами, как металлургические заводы с полным циклом производства. Недостатком системы G2 является ее высокая стоимость, которая полностью переносится на модель, так как последняя формируется в среде этой системы. Имеются обширные публикации рекламного характера, содержащие сведения о достоинствах и возможностях применения этой системы, однако структуры представления знаний о развитии процессов, алгоритмы обработки этих знаний и механизмы реализации процессов, как и большинство других технических решений, обеспечивающих эффективность G2, не опубликованы и, по-видимому, являются коммерческой тайной.

В статье излагается подход к разработке имитационных моделей промышленных установок, определяющий структуру модели и методы формализации знаний о развитии взаимодействующих процессов, а также основанные на этих методах алгоритмы реализации процессов. При использовании такого подхода модели различных установок различаются только формализованными в них знаниями о развитии и взаимодействии процессов в конкретных установках. Программная реализация таких моделей может быть достаточно

эффективно выполнена с помощью универсальных средств программирования, таких, например, как среда визуального компонентного программирования Delphi.

Структура модели

Функционирование промышленных установок определяется совокупностью протекающих в них параллельных взаимодействующих процессов различных типов динамики. Например, состояния машин и запирающих вентилях имеют два значения, то есть динамика процессов их изменения является дискретно-событийной. В то же время изменения состояний таких параметров, как температуры, давления, уровни и концентрации происходят большую часть времени непрерывно. Изменения состояния дискретных элементов установки могут вызывать как изменения динамики непрерывных процессов,

так и мгновенные дискретные изменения их состояний. Кроме того, выход непрерывных состояний за установленные пределы может вызывать дискретные изменения состояний и динамики процессов. В этих случаях процессы становятся гибридными. Поскольку непрерывный и дискретно-событийный процессы являются частными случаями гибридного процесса, то можно считать, что функционирование установок определяется совокупностью взаимодействующих гибридных процессов. С учетом этого в качестве основы математической модели таких процессов может быть использована модель гибридного автомата, расширенная за счет введения внешних дискретных и непрерывных воздействий [4]. Текущее состояние совокупности гибридных процессов может быть задано множеством вещественных переменных X , представляющих непрерывные составляющие, и множеством символьных переменных W , представляющих дискретные составляющие процессов. Среди этих переменных необходимо выделить подмножества независимых внешних воздействий: дискретных (V) и непрерывных (X_i). В составе множества W необходимо также выделить подмножество Q , содержащее переменные для представления состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов, и подмножество предикатов от непрерывных состояний (G). Предикаты могут определять состояния дискретных и режимы гибридных процессов. В результате текущее состояние модели установки может быть представлено следующими множествами:

$$W = V \cup Q \cup G \text{ и } X = X_i \cup X_s, \quad (1)$$

где X_s – непрерывные переменные состояния.

Для спецификации процессов необходимо задать функции переходов следующих типов:

$\sigma: W \rightarrow Q$ – функция трансформации состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов;

$\delta: W \times X \rightarrow X_s$ – функция трансформации непрерывных состояний для возможных режимов гибридных процессов;

$\gamma: X \rightarrow G \times \{\text{False}, \text{True}\}$ – зависимость значений предикатов от непрерывных состояний процессов.

С учетом этого математическая модель установки может быть представлена в виде следующего кортежа: $(V, Q, G, \sigma, \gamma, X, \delta, q_0, \text{Init})$, где q_0, Init – множества дискретных и непрерывных начальных состояний соответственно.

Функция γ является логической, ее реализация связана с вычислением неравенств от непрерывных состояний. Поскольку часто дискретные изменения состояний связаны с выходом непрерывных переменных из заданных диапазонов, то эту функцию удобно представлять совокупностью правил следующего вида:

$$(x_1 \geq a_k + x_2) \wedge (x_3 \leq b_k + x_4) \rightarrow g_k, \quad (2)$$

где $x_1, x_2, x_3, x_4 \in X, g_k \in G, a_k$ и b_k – константы, соответствующие заданному диапазону.

В общем случае дискретные воздействия, состояния и режимы процессов модели представляются символьными переменными. Те из них, которые имеют двухэлементные множества значений (открыт/закрыт, включен/выключен), могут быть представлены логическими переменными. Любую символьную переменную можно представить с помощью формулы нескольких логических переменных. Использование вместо символьных переменных логических переменных и формул позволяет, на наш взгляд, повысить удобство спецификации моделей и эффективность их программных реализаций. При использовании логических переменных формирование функции перехода σ можно производить с помощью логических связей между переменными, то есть описывать область определения функции с помощью логических формул, что делает описание более наглядным. В общем случае для спецификации модели могут потребоваться произвольные логические формулы. На наш взгляд, в качестве условия наиболее удобно использовать элементарные конъюнкции логических переменных. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как динамические ситуации. Вводя обозначение S_j для некоторой динамической ситуации, будем иметь:

$$S_j = s_{j1}, \dots, s_{ji}, \dots, s_{jn},$$

где $s_{ji} = w_{ji}$ или $s_{ji} = \neg w_{ji}, w_{ji} \in W, n = 1 \dots N_w, N_w = |W|$.

Обозначая множество значимых локальных ситуаций S , тип функции трансформации дискретных состояний можно определить, как $\sigma: S \rightarrow Q \times \{\text{False}, \text{True}\}$. Эта функция задается с помощью совокупности продукционных правил "Условие \rightarrow Действие", в которых в качестве условия может быть использована динамическая ситуация, а в качестве действия – процедура присвоения требуемых значений определенным состояниям и режимам процессов:

$$S_j \rightarrow r'_{j1}, \dots, r'_{ji}, \dots, r'_{jm}, \quad (3)$$

где $r'_{ji} = q_{ji}$ или $r'_{ji} = \neg q_{ji}, q_{ji} \in Q$.

В (3) использовано соглашение, принятое при спецификации процессов, по которому именами переменных со штрихом обозначаются состояния процессов, непосредственно следующие за состояниями, обозначенными переменными без штриха. Это означает, что вначале возникает ситуация, соответствующая условной части правила, после чего состояния из правой части принимают специфицированные значения. Действиями этих правил могут также быть процедуры выдачи информационных сообщений, соответствующих ситуациям в условных частях правил. В этом случае модель может использоваться в системах поддержки принятия решений и в обучающих системах.

Для реализации функции перехода δ необходимо создавать исполняемые спецификации непрерывных составляющих процесса для каждого режима. Спецификации, основанные на использовании дифференциальных уравнений, в случае моделирования промышленных установок имеют ряд недостатков. К ним можно отнести сложность создания и модификации (особенно для технологов), низкую эффективность реализации в цикле обновления состояния совместно с продукционными правилами. Более удобно специфицировать непрерывные процессы с помощью использования передаточных функций элементарных динамических звеньев, функциональных преобразователей и структурных схем их соединения. Спецификацию же элементарных процессов удобно производить на основе использования транзитивных моделей представления процессов [5]. Эти модели позволяют непосредственно определять отношение следования между входным воздействием и текущим состоянием процесса с одной стороны и новым следующим его состоянием – с другой. Отношение следования или транзитивное отношение представляет собой бинарное отношение на множестве вещественных чисел вида $\tau(y, y')$ или $y' = \tau(y)$, где y – текущее, а y' – следующее состояние процесса. Транзитивное отношение τ определяется параметрами элементарного динамического звена и длительностью интервала времени Δt между y и y' . Оно также зависит от входного воздействия x . Алгоритмы вычисления транзитивных отношений для основных элементарных динамических звеньев (интеграторов, апериодических и колебательных звеньев) приведены в [4]. Для реализации зависимости непрерывных состояний от логики гибридного процесса процедуры вычисления этих отношений необходимо включить в исполнительные части правил, условными частями которых являются ситуации. В результате правила, определяющие непрерывные составляющие гибридных процессов, принимают вид:

$$S_j \rightarrow y'_k = \tau_k(y_k, x_i), \quad (4)$$

где S_j – ситуация, соответствующая режиму, τ_k и y_k – соответствующее отношение и состояние, x_i – входное воздействие. Формирование структурных динамических схем производится путем использования одних со-

стояний в качестве входных воздействий при вычислении других состояний, а также использовании сумматоров и других функциональных преобразователей.

Таким образом, структура модели определяется множествами логических и вещественных переменных (1) и совокупностями трансформационных правил (2), (3), (4).

Апробация подхода

Имитационная модель описанной структуры может быть эффективно реализована с помощью универсальных средств программирования. Апробация подхода была проведена в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации (СПИИРАН) путем разработки с помощью визуальной среды объектно-ориентированного программирования Delphi компьютерной среды имитационного моделирования взаимодействующих гибридных процессов EnviCon [6], позволяющей создавать модели описанной структуры и проводить с ними модельные эксперименты. Модель в этой среде представляется программным объектом, который имеет в своем составе:

- подвекторы (массивы) логических переменных: входных, состояний, режимов и предикатов;
- подвекторы (массивы) вещественных переменных: входных и состояний;
- список правил трансформации: логических состояний и режимов, предикатов диапазонов, вещественных состояний;
- процедуры создания и сохранения модели, обновления переменных состояния модели.

Рассмотрим кратко информационное содержание основных составляющих модели. Записи в массивах представления переменных содержат имена переменных, их значения, а также текстовые комментарии к переменным. Все трансформационные правила реализуются с помощью условных операторов "if...then...". Запись о переменной в правилах содержит идентификатор подвектора, индекс переменной в этом подвекторе, указатель на значение переменной и указатель на ее имя. Указатель на значение введен для повышения быстродействия исполняющей процедуры, а указатель на имя — для упрощения процедур редактирования векторов и правил.

Задача алгоритма обновления состояния модели заключается в том, чтобы в цикле сканировать списки трансформационных правил модели и вычислять условную часть каждого правила. Для правил относительно непрерывных и логических состояний и режимов алгоритм анализирует результат и, если он имеет значение True, то выполняет действия, указанные в исполнительной части правила. Эти действия состоят в том, чтобы присвоить специфицированные логические значения состояниям и режимам из исполнительной части продукционных правил. Исполнительная часть правила трансформации непрерывных состояний содержит имя процедуры, ее параметры, указатель на переменную состояния и указатели на

аргументы. В этом случае алгоритм запускает процедуру и присваивает полученное значение переменной состояния, указанной в данном правиле. Что касается правил трансформации предикатов диапазонов, то в их условной части представлены неравенства относительно непрерывных переменных и констант, поэтому алгоритм непосредственно вычисляет значение предиката, задаваемое неравенством, и присваивает его соответствующей логической переменной. Алгоритм обновления состояния модели является объединением алгоритмов обработки всех трансформационных правил.

Среда имеет два режима работы: режим создания и редактирования модели и режим моделирования. В первом режиме используются редакторы переменных и правил. Редакторы переменных могут создавать необходимые переменные, присваивать им имена и значения. Редакторы правил могут создавать новые правила и формировать их условные и исполнительные части, используя имеющиеся соответствующие переменные. Для формирования исполнительных частей правил трансформации непрерывных состояний имеются процедуры реализации основных функциональных преобразований и элементарных процессов. Алгоритмы этих процедур рассмотрены в [7].

С целью иллюстрации разработанного интерфейса приведем реализацию в среде EnviCon простого гибридного процесса, имеющего место в релейной системе стабилизации уровня. В этой системе имеется постоянное понижение уровня со скоростью, пропорциональной уровню. Стабилизация осуществляется за счет открытия впускного клапана, когда уровень достигает минимально допустимого значения, и закрытия этого клапана при достижении уровнем максимально допустимого значения. На рис. 1 представлены фрагменты редакторов переменных модели. Спецификация непрерывного состояния занимает две ячейки таблицы. В одну заносится имя переменной, в другую — ее значение. В данной модели имеется пять непрерывных переменных: константы для максимального (L_{max}) и минимального (L_{min}) значений уровня, константа для скорости вверх и переменные для представления уровня и скорости вниз. Логическая переменная занимает одну ячейку. Ее значение задается цветом фона: зеленого для True и красного для False. Изменение значения производится двойным щелчком мыши на имени переменной. В модели имеется четыре логических переменных: два предиката ($L < L_{min}$) и ($L > L_{max}$), переменная для представления состояния входного клапана (VxКлОткр) и логическая константа True (EverTrue). На рис. 2 приведены фрагменты редакторов трансформационных правил, на которых представлены правила моделирования процессов в этой модели. Логическая переменная в левой части правила для предикатов (определяемый предикат) имеет значение True, если оба предиката (неравенства) в правой части имеют значение True. В противном случае эта пе-



Рис. 2 Переменные модели системы стабилизации уровня

ременная имеет значение False. Правило трансформации дискретных состояний занимает два ряда таблицы. В верхний ряд заносятся переменные, составляющие условную часть правила, а в нижний – переменные исполнительной части правила. Значения переменных можно менять двойным щелчком мыши.

Правило для непрерывных состояний имеет следующую структуру. Первой слева является определяемая переменная состояния, в следующей ячейке указывается имя процедуры, которая запускается при срабатывании правила. Далее идут коэффициент, два аргумента процедуры и переменная, представляющая ситуацию, при которой срабатывает данное правило. Следующие ячейки таблицы могут занимать параметры процедуры. Первое из приведенных правил определяет процесс повышения уровня с постоянной скоростью, если открыт входной клапан. Второе правило определяет процесс понижения уровня со скоростью пропорциональной уровню. Эта скорость задается третьим правилом. Последние два правила срабатывают всегда. Текущее значение уровня равно алгебраической сумме значений, определяемых первым и вторым правилами. Среда EnviCon имеет встроенные средства для текстовой и графической визуализации процессов. На рис. 3 приведен график процесса, имеющего место в описанной релейной системе стабилизации уровня. Процесс имеет участки повышения и понижения уровня. Оба участка являются отрезками соответствующих экспонент.

Апробация изложенного подхода и тестирование разработанной среды моделирования EnviCon также проводились в ходе разработки имитационных моделей двух установок по производству жидкого гелия (КГУ-150 [8] и ОГ-100) и воздухоразделительной установки АЖК-0,02. Все эти модели используются для преподавания в университетах курсов по криогенным специальностям. Модель ОГ-100 используется также как приложение к инструкции оператора на реальной установке.

Мнемосхема модели ОГ-100 (копия экранной формы) представлена на рис. 1. В левой части схемы приведены основные органы управления установкой. Имеются кнопки пуска и остановки, включения/выключения автоматических контуров регулирования, кнопки выбора режима управления. В правом верхнем углу схемы расположены кнопки включения/выключения подсистем откачки вакуума и заполнения азотной ванны. В модели реализован режим установки исходного состояния и два режима управления ТП,

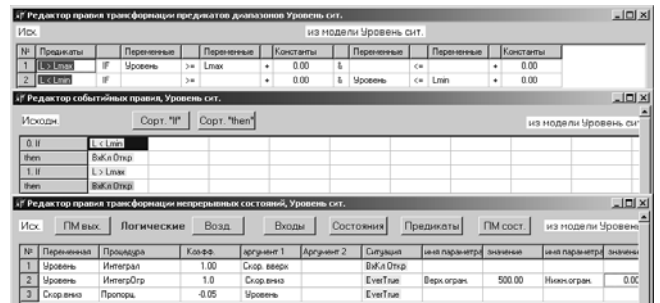


Рис. 3. Правила трансформации переменных модели системы стабилизации уровня

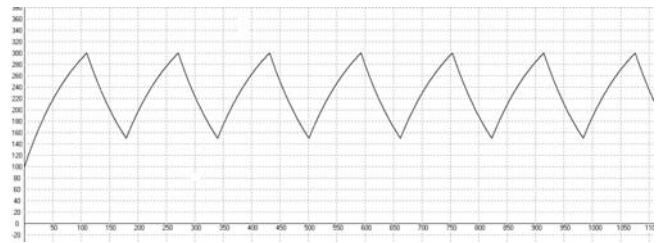


Рис. 4. График процесса стабилизации уровня

ручной и автоматический. В автоматическом режиме после пуска управление установкой производится полностью автоматически: включаются/выключаются контуры регулирования и необходимое оборудование, закрываются/открываются вентили и клапаны. В ручном режиме управляющие воздействия формируются путем внешних воздействий (щелчков мыши) на соответствующих устройствах или их органах управления. Таким способом производится запуск и останов машин, включение, реверс и выключение приводов вентиля и контуров регулирования, открытие/закрытие клапанов. В ручном режиме предусмотрена информационная поддержка действий оператора. Если режим поддержки включен, то при возникновении ситуации, требующей действий оператора, в окне инструкций появляется текстовое сообщение о необходимом действии. Окно инструкций расположено в левом верхнем углу схемы.

Модель ожижителя в реальном или модельном времени определяет и визуализирует изменения всех параметров установки и состояний машин и арматуры на всех стадиях ее операционного цикла: запуска, захлаживания, ожижения, слива жидкого гелия и планового останова установки. Реализована возможность моделирования возникновения и обработки нештатных ситуаций. Возможные нештатные ситуации разделены на два класса: аварии и аварийные ситуации. Это сделано потому, что алгоритмы обработки ситуаций из разных классов существенно отличаются друг от друга. Списки параметров, характеризующих нештатные ситуации, представлены в окнах с названиями "Аварии" и "Аварийные ситуации". При возникновении аварийной ситуации осуществляется алгоритм плановой остановки. В автоматическом режиме этот алгоритм реализуется автоматически. В ручном режиме в этом случае формируются инструк-

ции оператору, и алгоритм реализуется по его командам. При возникновении аварии всегда автоматически запускается алгоритм аварийной остановки.

Заключение

Проведенные исследования и разработки позволяют сделать вывод о том, что описанный подход может быть эффективно использован для создания как имитационных моделей промышленных установок, так и компьютерных средств моделирования дискретно-непрерывных процессов.

Список литературы

1. Avizzano C.A. Review of existing simulation tools. – <http://sirslab.dii.unisi.it/I-RAS/wp-content/uploads/2008/05/simulinkreviewx>.
2. Astrom K., Elmqvist H., Mattsson S. Evolution of continuous-time modeling and simulation // Proceedings of the 12th European Simulation Multiconference, ESM'98. 1998. <http://www.modelica.org/publications/papers/esm98his.pdf>
3. Попов Э.В. Статические и динамические экспертные системы. М.: Финансы и статистика. 1996. <http://www.info.oglib.ru/bgl/751.html>.
4. Henzinger T.A. The Theory of Hybrid Automata // Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 96). 1996.
5. Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G.J. Discrete Abstractions of Hybrid Systems // Proceedings of the IEEE. 2000. Vol. 88, № 7
6. Шнаков В.М. Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сб. докладов II всероссийской научно-практич. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика". Т.П. С.-Петербург. 2005.
7. Шнаков В.М. Спецификация знаний динамики на основе транзитивной модели непрерывных процессов // Тр. СПИИРАН / Под ред. Р.М. Юсупова, СПб: Наука, 2006. Вып. 3. Т. 1.
8. Буткевич И.К., Рыдник Е.А., Шнаков В.М. Новое о старом: об автоматизации криогенных гелиевых установок // Холодильный бизнес. 2001. №2.

Шнаков Владимир Михайлович – ст. научный сотрудник

Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

Контактный телефон (812)328-80-71, факс (812) 328-44-50. E-mail: vlad@iias.spb.su

АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ КОНТУРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

П.Г. Полько, О.С. Логунова, С.М. Андреев, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин
(ГОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)

Приведены результаты имитационного моделирования цифрового контура стабилизации инерционного с запаздыванием параметра ТП, синтезированного с использованием нечетких множеств и нечетких логических выводов, способного эффективно функционировать в условиях неполной информации об управляемом параметре. Показаны преимущества нечеткого управления, использующего упрощенные математические модели технологических объектов управления.

Ключевые слова: нечеткое управление, нечеткие регуляторы, правила нечеткого управления, качество переходного процесса.

В связи с интенсивным развитием программируемых технических средств управления все более широкое распространение получают системы, основанные на принципах теорий нечетких множеств и нечетких логических выводов [1, 2]. Нечеткое управление оказывается особенно полезным, когда ТП являются

слишком сложными и доступные источники информации интерпретируются атрибутивно, качественно, неточно или неопределенно.

Целью представленных исследований является синтез цифрового контура автоматической стабилизации технологических параметров с применением исполнительных механизмов постоянной скорости. В данной работе приведены результаты по синтезу и исследованию программно реализованной системы нечеткого управления подачей исходного рудного материала в агрегат предварительного мокрого измельчения барабанного типа, работающего в открытом режиме. Задачей системы является обеспечение стабильной работы измельчительного агрегата в условиях неполной информации об управляемом процессе.

Структурная схема синтезируемой замкнутой системы нечеткого управления технологическим параметром представлена на рис. 1.

Динамические свойства управляемого технологического параметра аппроксимируются последовательным соединением статического звена с характеристикой $F(X_{BX})$ и двух инерционных звеньев первого

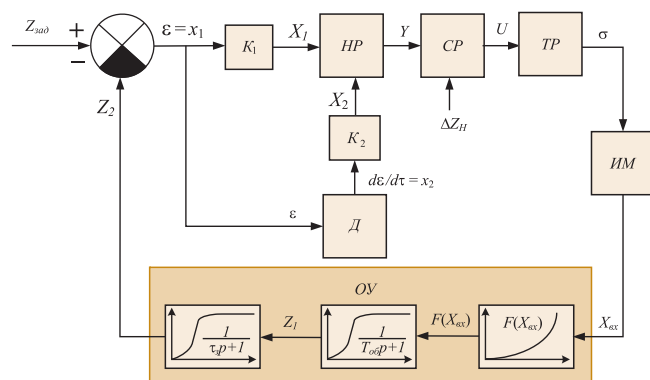


Рис. 1. Структурная схема синтезируемой замкнутой системы нечеткого управления инерционным технологическим параметром с запаздыванием