

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Л.А. Денисова (ОмГУ)

Предлагается подход к исследованию цифровых систем управления с переменными параметрами методом событийного моделирования. Представлена математическая модель дискретно-непрерывной системы автоматического регулирования, реализованная средствами событийного моделирования MATLAB/Simulink/Stateflow.

Ключевые слова: математическая модель, событийное моделирование, передаточные функции с переменными параметрами, цифровая система автоматического регулирования, переменный период квантования.

В настоящее время на многих отечественных объектах тепловой и атомной энергетики проводится модернизация средств автоматики. Для замены морально устаревшей, отработавшей свой ресурс локальной аппаратуры авторегулирования теплоэнергетических параметров в ЗАО "Автоматика-Э" (г. Омск) создаются программно-технические комплексы на базе цифровых локальных регуляторов ВЛР 2.1. Для настройки и испытаний цифровых автоматических регуляторов, а также проведения верификации их алгоритмического и программного обеспечения требуются средства математического моделирования, учитывающие особенности управляемых ТП.

При разработке систем автоматического регулирования (САР) необходимо принимать во внимание то, что объекты автоматизации, характеризуются, с одной стороны, непрерывностью ТП, а с другой – дискретным характером управляющих воздействий, формируемых цифровой системой регулирования. Кроме того, нужно иметь в виду, что спроектированная САР должна сохранять свои показатели качества при действии возмущающих факторов различной природы, влекущих за собой изменения параметров объекта управления.

Также важным моментом является то, что в реальных цифровых автоматических регуляторах период квантования является нестабильным, переменным, зависящим от времени обработки информации процессорным устройством регулятора. То есть случайный характер дискретизации надо рассматривать как дополнительное возмущающее воздействие и учитывать при проектировании систем управления.

Таким образом, цифровая система регулирования, состоящая из непрерывного объекта управления с переменными параметрами и цифрового регулятора, является непрерывно-дискретной, гибридной системой [1] и ее исследование требует применения специального математического аппарата.

В работе рассмотрен подход к исследованию динамических характеристик системы управления с переменными параметрами средствами событийного моделирования. Для иллюстрации предлагаемого подхода приводится математическая модель

системы автоматического регулирования типового объекта автоматизации – уровня жидкости в резервуаре. Данная модель реализована в интерактивной среде для выполнения научных и инженерных расчетов MATLAB с пакетами расширения Simulink и Stateflow.

Пакет событийного моделирования Stateflow, основанный на теории конечных автоматов, предоставляет возможности моделирования процессов, управляемых событиями [2]. Stateflow является средством, пригодным для проведения вычислительных экспериментов с системами управления, представленными в гибридно-автоматной форме, реализующим графические функции и операторы темпоральной логики.

На рис. 1 приведена схема моделирования системы регулирования, выполненная в среде MATLAB/Simulink/Stateflow. Модель САР содержит подсистемы: модели цифрового импульсного регулятора, рабочего органа – регулирующего клапана (РК) и технологического объекта управления. Сигнал рассогласования на входе в регулятор формируется алгебраическим суммированием сигналов заданного, текущего значений регулируемого параметра (уровня жидкости в резервуаре), а также сигнала от жесткой обратной связи по положению РК.

Каждая из подсистем для наглядности представлена двумя модельными реализациями: выполненными в рамках стандартного набора MATLAB/Simulink и созданными средствами Stateflow. При исследовании систем с постоянными параметрами выходы моделей идентичны, средства Stateflow дают дополнительную возможность моделирования систем с переменными параметрами.

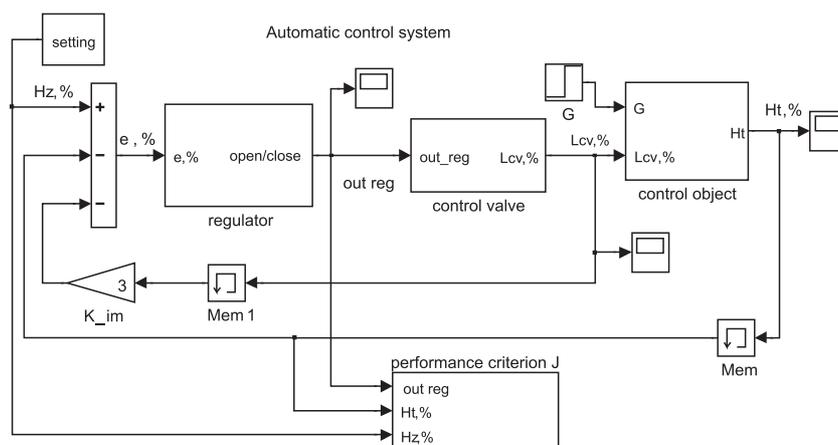


Рис. 1. Схема моделирования САР в среде MATLAB/Simulink/Stateflow

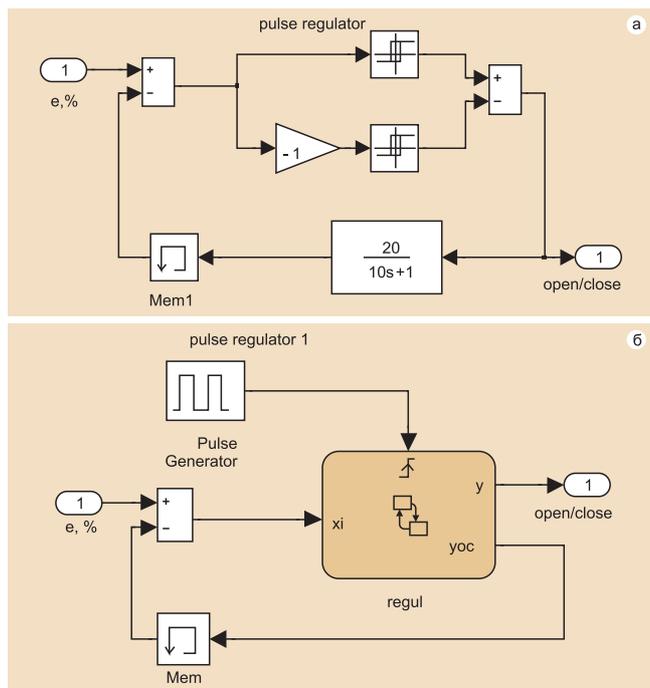


Рис. 2. Схема моделирования импульсного регулятора в среде а) MATLAB/Simulink; б) MATLAB/Simulink/Stateflow

Рассмотрим подробнее каждую из подсистем. Подсистема regulator (рис. 2) – это модель импульсно-регулятора. На рис.2,а представлена модель, построенная с помощью стандартных средств Simulink. Входящее в состав традиционного импульсного регулятора трехпозиционное релейное звено с гистерезисом [3] реализовано двумя двухпозиционными реле для входных сигналов разной полярности. В местной обратной связи присутствует инерционное звено с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$$

(k – коэффициент передачи, T – динамическая постоянная звена) с постоянными параметрами, заданными своими численными значениями.

С целью моделирования работы регулятора с переменным периодом квантования в Simulink-модель включена Stateflow-диаграмма, реализующая релейные звенья и инерционное звено в местной обратной связи регулятора (рис. 2, б).

Stateflow-диаграмма pulse regulator 1 (рис. 3) содержит состояние A_state, вызывающее две графические функции f_1 и f_2 . Графическая функция f_1 реализует дискретную модель инерционного звена, которая задается в виде аппроксимирующего разностного уравнения

$$y_i = \frac{T}{T + h_1} y_{i-1} + \frac{kh_1}{T + h_1} x_i,$$

где h_1 – такт дискретизации; $x_i, y_i(y_{i-1})$ – значения входного и выходного сигналов в текущем (предыдущем) такте.

Графическая функция f_2 реализует релейные элементы с помощью конструкции из точек принятия

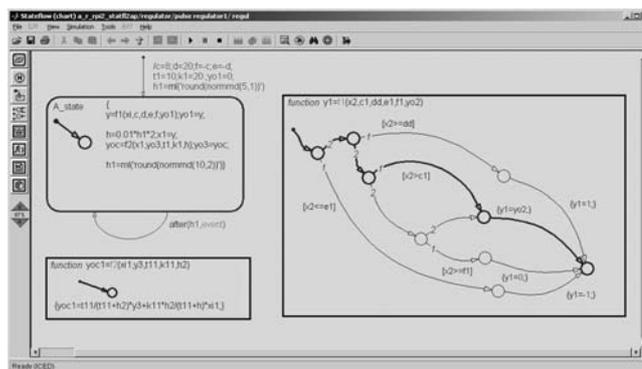


Рис. 3. Stateflow-диаграмма импульсного регулятора с переменным тактом квантования

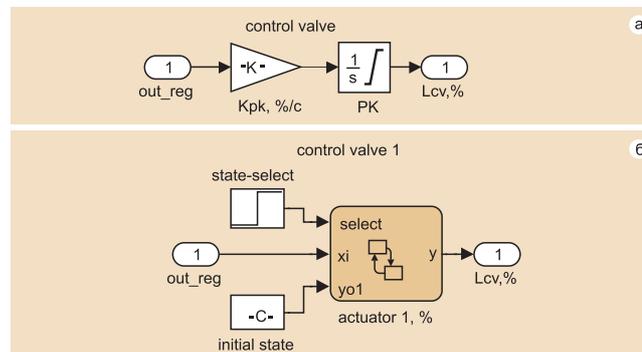


Рис. 4. Схема моделирования регулирующего клапана в среде а) MATLAB/Simulink; б) MATLAB/Simulink/Stateflow

решений и переходов, которая аналогична логической схеме "если – то".

Для реализации переменного периода дискретизации используется функция AFTER темпоральной (временной) логики. Временной логический оператор after – двоичный оператор, операндами которого является число Stateflow-событий. Для циклической работы состояния A_state предназначено выражение after(h1,event), что означает: "активизировать состояние A_state не ранее, чем через h1 временных циклов (наступлений событий event)". При этом величина такта квантования h_1 носит случайный характер и вычисляется при каждой активизации состояния A_state. События event задаются в модели Simulink-блоком Pulse Generator (генератор импульсов) с периодом, выбранным в соответствии с тактом дискретизации непрерывной части – модели объекта управления. Выходными сигналами Stateflow-диаграммы pulse regulator1 являются вычисленные значения управляющего сигнала на регулируемый клапан и сигнала местной обратной связи, которые действуют в течение следующего такта.

Подсистема control valve (рис. 4) представляет собой модель регулирующего клапана, управляющего расходом воды на стоке из емкости, снабженного электрическим исполнительным механизмом (ИМ). Модель РК с ИМ, выполненная стандартными средствами Simulink (рис. 4, а), представлена усиленным звеном с коэффициентом передачи, учитываю-

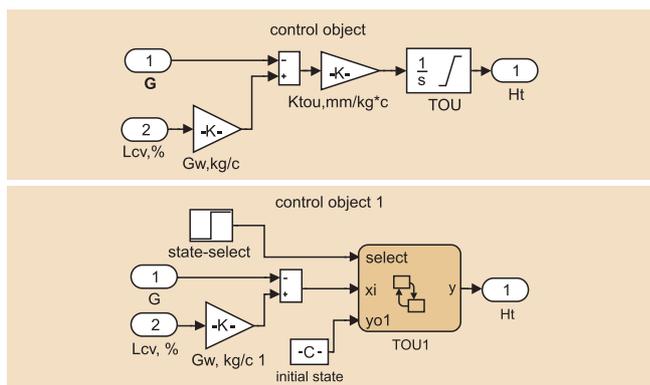


Рис. 5. Схема моделирования технологического объекта управления в среде а) MATLAB/Simulink; б) MATLAB/Simulink/Stateflow

щим пропускную способность клапана и его время хода, а также и интегратором с ограничениями.

В случае перехода по технологическим причинам на резервный регулирующий клапан его параметры – время хода и ограничения – могут изменяться. Для учета этого в Simulink-модель включена Stateflow-диаграмма (рис. 4, б), реализующая интегрирующее звено с переменными параметрами. Структура и функции данной Stateflow-диаграммы такие же, как и у рассмотренной ниже Stateflow-диаграммы объекта управления.

Подсистема control object (рис. 5) – это модель технологического объекта управления, в которой учтено, что уровень в емкости является интегралом от материального баланса между притоком и оттоком жидкости. Поэтому объект управления в среде Simulink (рис. 5, а) представлен усилительным звеном с коэффициентом передачи, обратно пропорциональным постоянной интегрирования, а также интегрирующим звеном с ограничениями и возможностью установки начального состояния.

В случае наличия в резервуаре пароводяной смеси при изменении плотности жидкости, зависящей от давления и температуры, меняются динамические характеристики объекта, а именно постоянная интегрирования, которая является переменным параметром в рассматриваемой модели. Для моделирования соответствующего объекту интегрирующего звена с переменными параметрами в Simulink-модель включена Stateflow-диаграмма TOU1 (рис. 5, б).

Stateflow-диаграмма TOU1 (рис. 6) вызывается на каждом шаге моделирования. Вычисления производятся с тактом дискретизации $h = 0,01$ с, что позволяет считать процесс непрерывным, так как такт дискретизации цифрового регулятора не менее $h_1 = 0,1$ с.

При реализации средствами MATLAB/Simulink передаточная функция интегрирующего звена

$$W(s) = \frac{1}{T_u s},$$

причем постоянная интегрирования T_u может быть задана только своими численными значениями. Соответствующая дискретная модель, которая реализуется

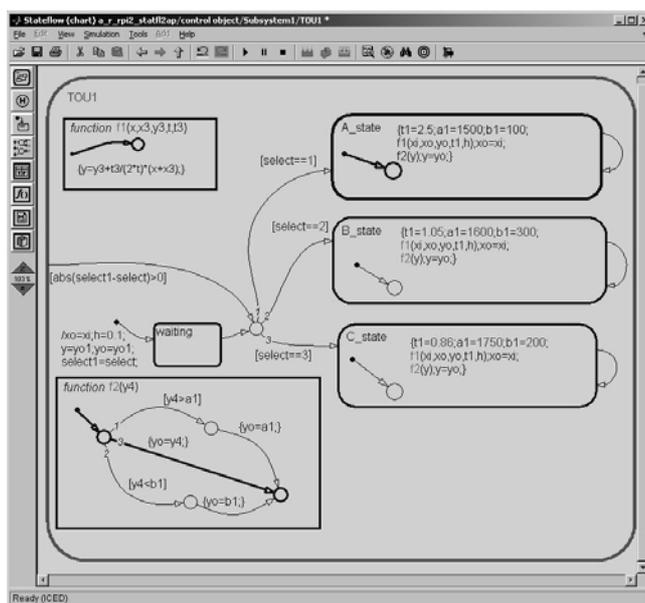


Рис. 6. Stateflow-диаграмма передаточной функции интегрирующего звена с переменными параметрами

средствами Stateflow графической функцией f_1 , задается в виде аппроксимирующего разностного уравнения

$$y_t = y_{t-1} + \frac{h}{2T_u} (x_t + x_{t-1}),$$

где h – такт дискретизации; $x_t, (x_{t-1}), y_t, (y_{t-1})$ – значения входного/выходного сигналов в текущем (предыдущем) такте.

Stateflow-диаграмма TOU1 содержит четыре состояния. В начальный момент активное состояние ожидания waiting, которое является общим источником для состояний А – С. Переход из состояния waiting к одному из трех остальных состояний происходит через подключаемое соединение (точку принятия решения). В зависимости от значения переменной select (соответствует определенному режиму работы системы) выполняется переход в одно из состояний А – С.

Каждое из состояний А – С вызывает графические функции f_1 и f_2 , имея свой набор фактических параметров, включая постоянную интегрирования реализуемой передаточной функции. Графическая функция f_1 возвращает в качестве результата выходной сигнал передаточной функции без учета ограничений. Графическая функция f_2 реализует ограничения интегратора.

Такая реализация упрощает Stateflow-модель: вместо того, чтобы определять значение выходной переменной внутри каждого из состояний, оно определяется единожды в графических функциях. При смене режима работы системы и изменении значения параметра select через внутренний переход Stateflow-диаграммы происходит возврат к подключаемому соединению и к новому состоянию из А – С.

Предлагаемая модель интегрирующего звена с ограничениями с переменными параметрами совместно с аналогично построенной моделью апериодического звена с переменными параметрами, также вы-

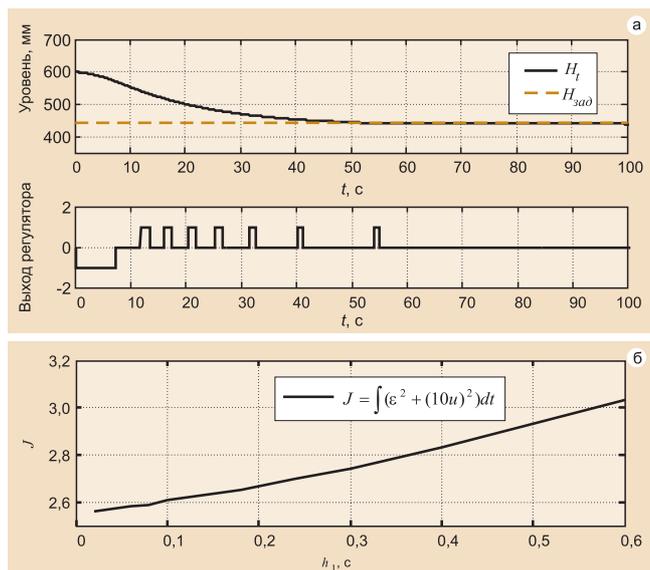


Рис. 7. Моделирование системы с переменными параметрами в среде MATLAB/Simulink/Stateflow, где а) переходные характеристики; б) зависимость критерия качества регулирования от периода квантования

полненной средствами MATLAB/Simulink/Stateflow [4], предназначена для имитации работы САР в случаях, когда из опыта эксплуатации известно, что характеристики объекта управления изменяются при его функционировании.

Представленная в работе математическая модель входит в состав испытательного стенда ЗАО "Автоматика-Э", предназначенного для проведения динамических испытаний САР на базе цифровых локальных регуляторов ВЛР 2.1.

Для выбора периода квантования принят интегральный показатель качества

$$J = \int_0^T (\epsilon^2 + (10u)^2) dt,$$

где ϵ – величина отклонения регулируемого параметра от заданного значения; u – выходной сигнал регулятора на ИМ; t – текущее время; T – верхний предел ин-

тегрирования, выбираемый не меньше времени переходного процесса. Критерий J учитывает величину рассогласования ϵ и взвешенного выхода u регулятора. Минимизация принятого показателя позволяет обеспечить быстродействие, отсутствие перерегулирования, а также уменьшение числа срабатываний ИМ.

На рис. 7 приведены результаты моделирования работы рассматриваемой системы: переходные характеристики при обработке регулятором с переменным периодом квантования возмущения заданием на 20% (рис. 7, а) и зависимость критерия качества регулирования от периода квантования (рис. 7, б). По технологическим соображениям и с учетом критерия качества рекомендовано обеспечить период квантования не более 0,1 с.

Использование предлагаемого подхода делает возможным на имитационной модели с переменными параметрами провести испытания и настройку систем управления в различных режимах работы, что значительно сокращает сроки их проектирования.

Кроме того, такой подход может быть использован при исследовании сложных для анализа аналитическими методами непрерывно-дискретных нестационарных динамических систем при детерминированных и случайных воздействиях, а также систем с несколькими не синхронно работающими регуляторами с различными периодами квантования.

Список литературы

1. *Рогачев Г.Н.* Использование гибридно-автоматного метода для описания систем автоматизации и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. №12.
2. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М.: Солон-Пресс. 2005.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: Уч. в 5-и тт. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. Пупкова К.А. и Егупова Н.Д. М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 2004.
4. *Раскин Е.М., Денисова Л.А., Сеницын В.П., Нестеров Ю.В.* Математическая модель системы питания парогенератора энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2010. №7.

Денисова Людмила Альбертовна – канд. техн. наук, доцент кафедры "Автоматизированные системы обработки информации и управления" Омского государственного технического университета (ОмГТУ), старший научный сотрудник ЗАО "Автоматика-Э".

Контактный телефон (381-2) 23-23-43. E-mail: ladenisova@mail333.com

Новые модули ввода/вывода для системы связи SmartWire-DT

Ведущий производитель компонентов и систем электротехники и автоматики, электрический сектор компании Eaton предлагает новые модули ввода/вывода, которые могут подключаться к соединениям и системе связи SmartWire-DT. К линейке цифровых модулей добавлены четырехканальный входной модуль с трехпроводным соединением и встроенным источником питания с защитой от коротких замыканий, а также восьмиканальный выходной модуль (8 x 24 В DC, 0,5 А).

Несколько модулей для подключения аналоговых датчиков и приводов являются новыми. Во-первых, входной модуль с четырьмя

входами для переменных измерений тока и напряжения (0...20 мА, 0...10 В). Во-вторых, входной модуль с двумя входами и двумя выходами для переменных измерений и вывода сигналов тока и напряжения (0...20 мА, 0...10 В). В третьих, входной модуль с пятью температурными входами с помощью 2/3-проводной технологии для датчиков PT100, PT1000, Ni1000. Пользователи могут подключать модули к системе связи SmartWire-DT в любом месте шкафа управления. Это обеспечивает гибкость при оптимальном использовании пространства в шкафу управления и снижает монтаж, требуемый для цифровых и/или аналоговых датчиков и приводов.

Http://www.moeller.ru u www.eaton.com