

М.А. Поляков, И.А. Андриас

**ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР ГИБРИДНЫХ
АВТОМАТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Аннотация. Предложены модели функциональных структур гибридных автоматов систем управления в виде иерархической структуры контуров дискретного и непрерывного управления. Описаны типовые элементы этих функциональных структур – конечные автоматы, входные и выходные операционные автоматы. Входы и выходы этих элементов предложено разделить на две группы – информационные и управляющие. Приведен пример реализации гибридных автоматов с помощью предложенных моделей.

Ключевые слова: функциональные структуры управления, гибридные автоматы, теоретико-множественные модели структур управления.

Введение

В основе формальных описаний динамических систем лежат дифференциальные уравнения и конечные автоматы. В первом случае описывается непрерывное, а во втором – дискретное поведение системы.

Существует также обширный класс динамических систем, в которых дискретное и непрерывное поведение присутствуют одновременно. Такие системы формализуют гибридными автоматами [1,2]. Так одна из популярных интерпретаций гибридного автомата H [3] описывается кортежем:

$$H=(W,X,M,F,T), \quad (1)$$

где $W = \{u, y\}$ – множество входных (u) и выходных (y) внешних переменных; X определяет непрерывное пространство, для которого непрерывные переменные состояния x могут принимать свои значения; M – множество режимов непрерывного поведения из которых только один режим активен в данный момент времени; F – дискретное множество дифференциально-алгебраических уравнений (DAE) первого порядка; T – множество переходов от одного режима к другому. Каж-

дое DAE уравнение определяет взаимосвязь между переменными состояния (x), их производными по времени первого порядка (\dot{x}) и входами (w):

$$f_m(x, \dot{x}, w) = 0, m \in M.$$

Решение этих DAE уравнений называется действиями или поведением непрерывного режима определяет непрерывную эволюцию системы, когда она находится в этом режиме. Переходы или события, представляют логические условия, при которых происходит смена режима. Если ни одно из условий перехода не выполняется, то гибридные автоматы остаются в текущем режиме, а переменные состояния развиваются в соответствии с указанным поведением. Переходы определяют дискретную эволюцию системы, описывая, как режим непрерывного поведения обновляется с течением времени.

Пример гибридного автомата, который управляет одномерной моделью автомашины, приведен на рис.1.

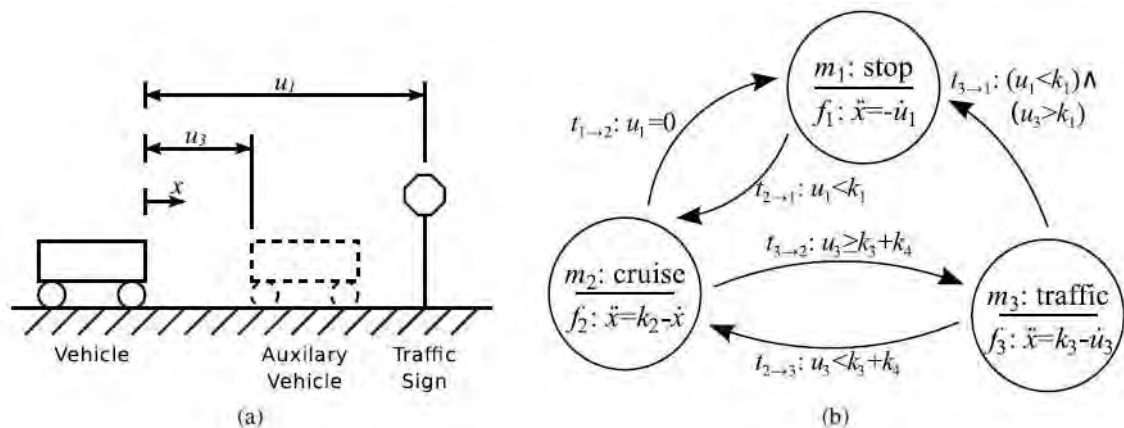


Рисунок 1 - Структура (a) и граф гибридного автомата (b) системы управления одномерной моделью автомашины [3]

Система управления включает управляемую автомашину (Vehicle), автомашину - помеху движению (Auxiliary Vehicle) и знак остановки (Traffic Sign). Положение управляемой автомашины задается координатой x , входными переменными u_1 (расстояние до знака остановки) и u_3 (расстояние до автомашины – помехи). Переменные состояния это скорость \dot{x} и ускорение \ddot{x} управляемой автомашины. Система находится в одном из трех режимов непрерывного поведения: m_1 – торможение; m_2 – разгон и m_3 – сохранение текущей скорости. Поведение системы в этих режимах описывается DAE уравнениями

$f_1 - f_3$. Множество переходов T состоит из пяти переходов, каждый из которых задает условие перехода.

Таким образом, сравнивая дискретный и гибридный автоматы, во-первых отметим, подчиненную роль непрерывного управления, так как конкретное поведение возникает в результате перехода системы в соответствующее состояние. Во-вторых, деятельность дискретного автомата описывается выходными дискретными переменными (типа «включить/выключить исполнительный механизм»). А у гибридного автомата деятельность определяется решениями DAE уравнений. При проектировании гибридных автоматов возникает ряд вопросов, которые недостаточно освещены в известной автору литературе: из каких блоков должен состоять гибридный автомат; как эти блоки взаимодействуют между собой, то есть какова функциональная структура гибридного автомата; как такие автоматы работают в иерархических структурах управления? Отсутствие таких моделей усложняет проектирование систем управления на основе использования гибридных автоматов и является нерешенной научно-технической задачей.

Целью настоящей работы является упрощение процесса проектирования систем гибридного управления на основе выделения и описания на теоретико-множественном уровне типовых элементов и структур.

Модели и структуры гибридных автоматов

Блочный состав гибридных автоматов сформировался в ходе эволюции представлений о системе управления. Управление техническим устройством, как отдельный вид деятельности, возникло одновременно с созданием машин и потребовало выделения части машины в отдельный блок, т. е. возникла система «объект управления - управляющее устройство». Далее для описания взаимодействия этой системы с остальным миром введены понятия внешней среды, входов, выходов и функций блоков. Внешняя среда определена как часть внешнего мира, которая непосредственно влияет на работу системы управления, имеет входы, выходы и границу с ней. В более детальных исследованиях внешняя среда также представляется динамической системой с внешней границей и сложной структурой.

Как известно, процесс управления включает в себя измерительные и логические операции, операции формирования воздействий на объект управления. Блоки системы, выполняющие эти операции,

получили название операционных и управляющих автоматов. Операционные автоматы разделяют на входные (измеряющие) и выходные (формирующие). С учетом многообразия физических параметров входов и выходов объекта управления в системе управления выделены блоки преобразователей этих параметров в электрический сигнал – датчики и исполнительные механизмы. Структурная схема описанной системы приведена на рис.2.

Автомат IOA (рис. 2) измеряет значения входных сигналов, сравнивает их с опорными значениями и формирует на своем выходе логические сигналы для FSM. В расширенной трактовке IOA это преобразователи сигналов, которые напрямую соединяются со входами ООА как показано на рис. 3.

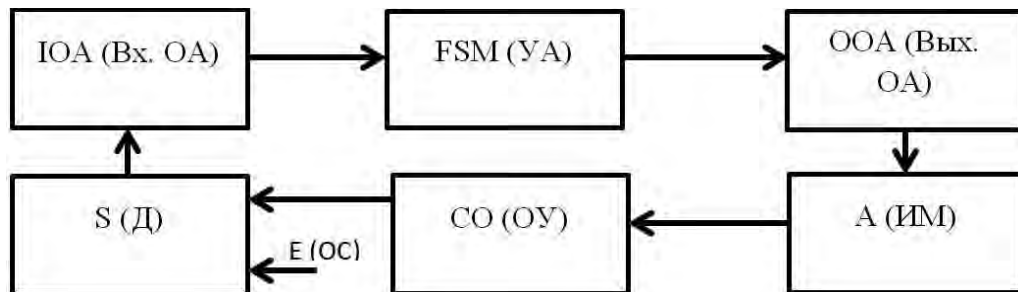


Рисунок 2 – Структура системы управления: IOA – Input Operational Automata (Входной Операционный Автомат); FSM – Finite State Machine (Управляющий Автомат); ООА - Output Operational Automata (Выходной Операционный Автомат); S – Sensors (Датчики); CO – Control Object (Объект Управления); А – Actuators (Исполнительные механизмы); E – Environment (Окружающая среда)

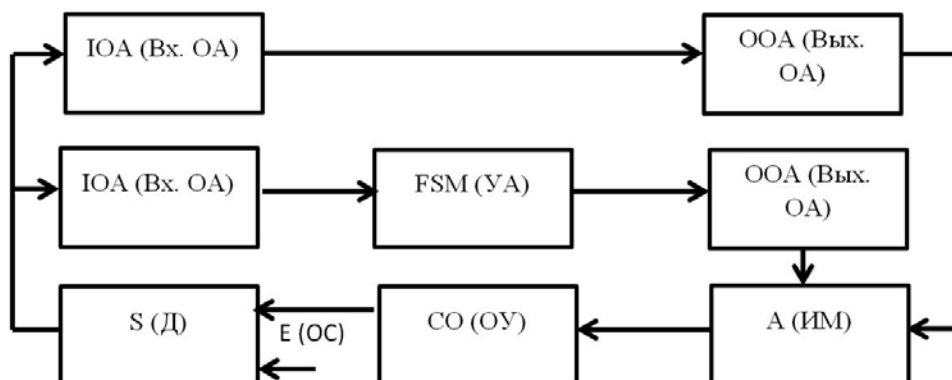


Рисунок 3 - Структура системы с контурами непрерывного и дискретного управления

В структуре системы управления приведенной на рис.3 действуют независимо друг от друга два контура управления:

CO – S – IOA – OOA – A – CO – контур непрерывного управления.

CO – S – IOA – FSM – OOA – A – CO - контур дискретного управления.

Это расширяет функциональные возможности системы.

Следующий этап развития систем управления назовем этапом «управления управлением». Целью такого управления является адаптация системы к изменяющимся условиям внешней среды, целям функционирования системы и техническим состояниям элементов системы управления. Различают параметрическую и структурную адаптации. Последняя предполагает возможность исключения некоторых блоков управляющего устройства из контура управления или включения их в контуры управления, а также выполнения других операций управления. Для этого блоки должны иметь не только информационные, но и управляющие входы и выходы. Внешние связи блоков управляющего устройства показаны на рис. 4.

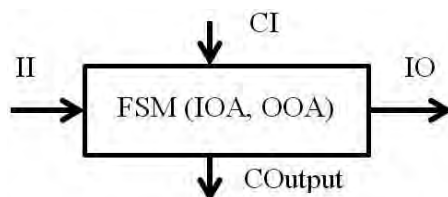


Рисунок 4 - Внешние связи блоков управляющего устройства: II – Information Inputs (Информационные Входы); CI – Control Inputs (Управляющие Входы); IO - Information Outputs (Информационные Выходы); COutput – Control Outputs (Управляющие Выходы)

С учетом описанных вариантов построения систем управления, структура гибридного автомата заданного кортежем (1) примет вид, показанный на рис.5.

Структура имеет два уровня. Верхний уровень содержит автомат FSM в контуре дискретного управления, а нижний – три контура непрерывного управления, которые описываются DAE уравнениями $f1 - f3$, приведенными на рис.1. Автомат OOA в контуре дискретного управления показан пунктиром, так как в данном примере отсутствуют выходные переменные в этом контуре.

В приведенном примере контур дискретного управления является инициатором изменений в контурах непрерывного управления. Назовем такой тип управления Master-Discrete-Slave-Continues (MDSC). На рис.6 приведен пример структуры гибридного автомата

типа Master- Continues -Slave- Discrete (MCSD) в которой выходной автомат в контуре непрерывного управления изменяет поведение блоков FSM, IOA, OOA в контуре дискретного управления.

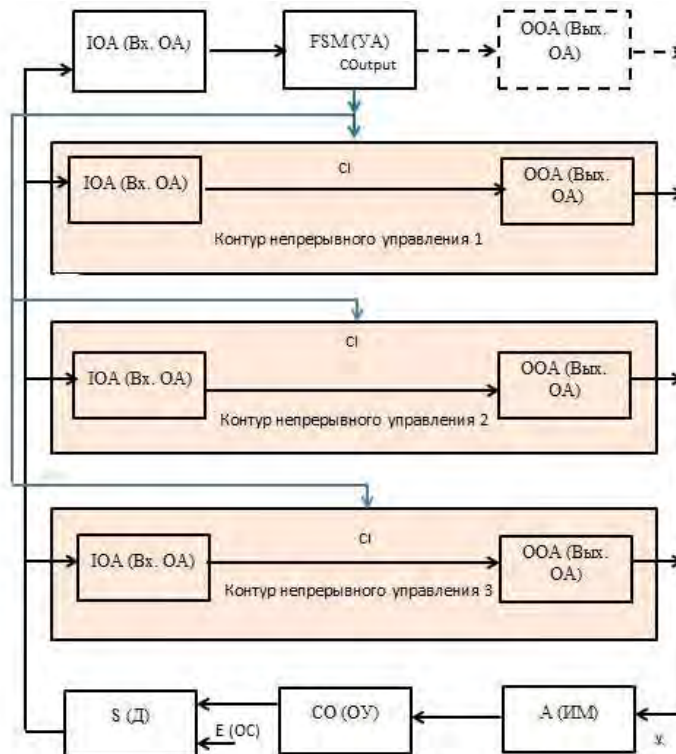


Рисунок 5 - Двухуровневая структура гибридного автомата на основе блоков IOA, OOA и FSM

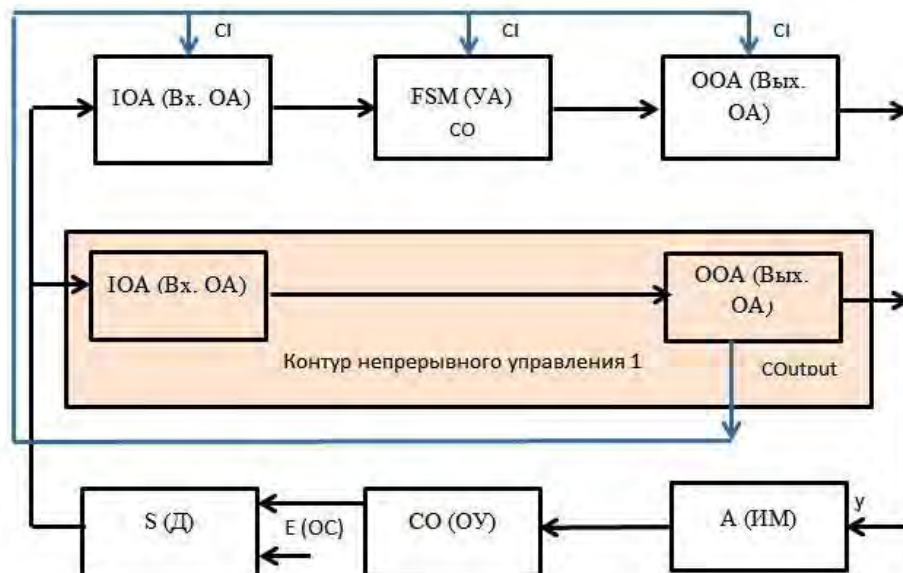


Рисунок 6 - MCSD структура гибридного автомата на основе блоков IOA, OOA и FSM

Наконец, возможна структура гибридного автомата, которая объединяет MDSC и MCSD структуры. С помощью управляющих вхо-

дов CI и выходов COutput возможно образование иерархий в рамках одного вида управления – дискретного или непрерывного.

Рассмотренные структуры гибридных автоматов представляют собой графическую интерпретацию теоретико-множественных моделей гибридных автоматов на уровне множеств элементов, внутренних и внешних связей [4-6].

Выводы

Поведение гибридных автоматов в системе управления может быть с помощью типовых блоков входных, выходных операционных автоматов и управляющего автомата, которые функционируют в иерархии структур управления.

Эти блоки образуют двухуровневые структуры, в которых управляющую роль могут играть как управляющие автоматы контуров дискретного управления, так и операционные автоматы контуров непрерывного управления.

Предложенные структурные схемы позволяют моделировать гибридное поведение в системе управления на теоретико-множественном уровне, что упрощает процесс проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Branicky M. S.. Handbook of Networked and Embedded Control Systems, chapter “Introduction to hybrid systems”, pages 91–116. Birkhauser, 2005.
2. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сенченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем.- СПб.: БХВ-Петербург, 2002, 464 с.: ил.
3. Ly D. L., Lipson H. Learning Symbolic Representations of Hybrid Dynamical Systems. // Journal of Machine Learning Research 13 (2012) 3585-3618
4. Поляков М.А. Теоретико-множественные модели интегрированных систем управления // Днепропетровск, «Системні технології».- 2009, №4, с. 131-137.
5. Поляков М.А. Теоретико-множественные модели элементов и структур интегрированных контроллерных систем управления // Днепропетровск, «Системні технології».- 2012, №2, с. 75-81.
6. Поляков М.А. Теоретико-множественные модели функциональных структур систем когнитивного управления // Дніпро, «Системні технології».- 2017, №3(110), с. 16–23.