

МУЛЬТИМОДЕЛЬНАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА

М.В. Бураков, М.С. Брунов (Санкт-Петербург)

Концепция мультимодельного управления известна достаточно давно [1–3]. Она позволяет обеспечить адаптивное поведение системы управления в условиях, когда текущие параметры объекта не могут быть точно измерены.

Общая структура адаптивной мультимодельной системы с переключением представлена на рис. 1.

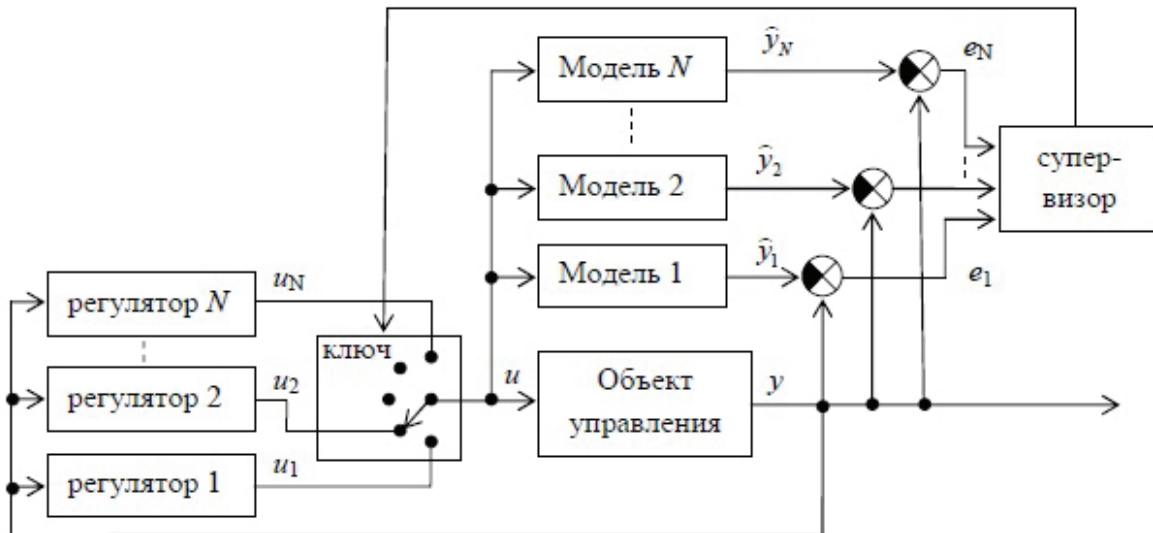


Рис. 1. Структура мультимодельной системы управления

В структуре «классической» мультимодельной адаптивной системы (рис. 1) каждый регулятор синтезируется при известных параметрах соответствующей ему модели. В каждый момент времени активным является только один регулятор j , выбираемый супервизором по критерию минимальной ошибки выхода модели:

$$j = \arg \min_i \{e_i(t)\}.$$

Недостатки «жесткой» логики при работе переключательной системы очевидны:

- каждой модели должна соответствовать своя область в параметрическом пространстве объекта, и на границах областей могут происходить резкие скачки сигнала управления;
- ошибка $e_i(t)$ также может претерпевать скачкообразные изменения, что требует использования более сложных оценок соответствия объекта и модели.

Предлагаемый подход к организации адаптивной мультимодельной системы позволяет устранить эти замечания. Он предполагает использование аппарата нечеткой логики, позволяющего учитывать градации степени соответствия модели и объекта для получения сигнала управления в виде «взвеси» сигналов отдельных регуляторов.

В настоящее время наиболее распространены два подхода к нечеткому моделированию: модели Мамдани и модели Такаги – Сугено.

Модель Мамдани [4] является набором нечетких правил, где каждое правило задает одну точку нечеткого отображения пространства входов модели X в выход Y . Правила имеют вид: Если $x = A$, то $y = B$, где A и B – нечеткие множества.

Алгоритм нечеткого вывода обеспечивает интерполяцию между этим множеством точек, так что возникает некоторая геометрическая поверхность отображения. Задача структурного соответствия модели и объекта при этом не ставится, т. е. нечеткая модель Мамдани является «черным ящиком». Модель Мамдани может использоваться как для описания объекта, так и для описания закона управления им. В [5] предложена адаптивная структура из множества регуляторов Мамдани, активность которых зависит от текущего качества управления и его «предыстории», так что при ухудшении качества подавляются активные регуляторы.

Модель Такаги – Сугено [6] отличается от модели Мамдани формой правил, в которых заключение является аналитической зависимостью от входных переменных: Если $x = C$, то $y = f(x)$, где C – нечеткое множество, f – функция управления, обычно линейная. Посылка правила здесь описывает область действия регулятора, при этом области различных регуляторов могут перекрываться. При использовании этого подхода возникает проблема разбиения фазового пространства объекта на кластеры [7].

Предлагаемый подход к построению мультимодальной адаптивной системы отличается от модели Такаги – Сугено тем, что рассматривает не фазовое пространство объекта, а его параметрическое пространство.

Рассмотрим вариант организации мультимодального управления системой «шарик на планке» с переменной массой шарика, основанный на использовании множества модальных регуляторов, сигналы которых согласуются с помощью схемы нечеткого логического вывода.

Преимущество модального управления заключается в возможности аналитического расчета параметров, позволяющего поместить полюса замкнутой системы в заранее выбранное положение, обеспечив тем самым нужные характеристики переходных процессов. Однако каждый регулятор синтезируется для конкретных параметров объекта.

Рассмотрим математическую модель объекта управления. Введем обозначения: θ – угол наклона желоба, m – масса шарика, r – радиус шарика, p – координата вдоль оси желоба, l – длина планки, J_1 и J_2 – моменты инерции планки и шарика, τ – управляющий момент.

Схема сил, действующих в системе, показана на рис. 2.

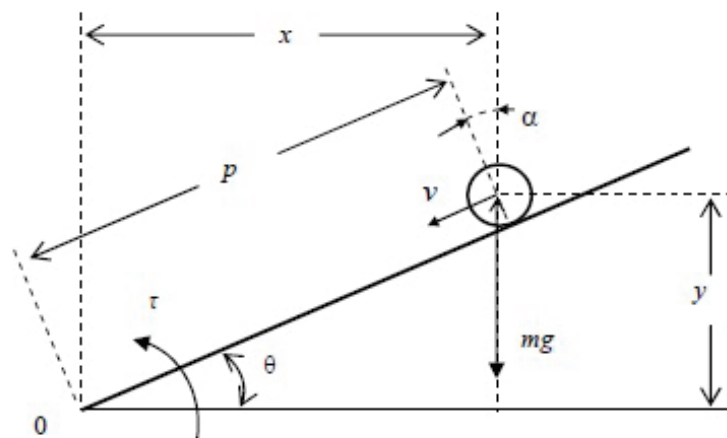


Рис. 2. Схематическое изображение системы планка-шарик

Нелинейная модель объекта управления описана, например, в [8], она имеет вид:

$$\begin{cases} (mp^2 + J_1)\ddot{\theta} + 2mp\dot{p}\dot{\theta} + mgp \cos \theta = \tau, \\ \left(\frac{J_2}{r^2} + m\right)\ddot{p} + mg \sin \theta - mp\dot{\theta}^2. \end{cases} \quad (1)$$

Линеаризуя (1) относительно рабочей точки, можно получить линейную модель 4-го порядка, которая может быть использована для модального синтеза.

Как показало моделирование, модальный закон управления оказывается чувствительным к изменению массы шарика (рис. 3, где 0.6 м – уставка при номинальных параметрах).

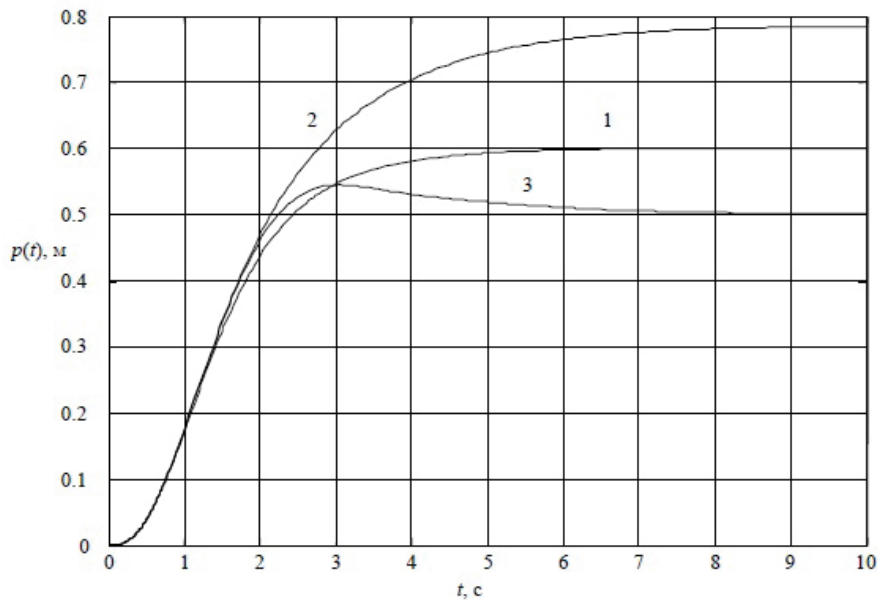


Рис. 3. Переходные процессы по положению при различных массах шарика: 1 – номинальная масса, 2 – увеличенная вдвое, 3 – уменьшенная вдвое

Как показывает рис. 3 при изменении массы шарика возникает значительная статическая ошибка. Для описания адаптивного закона управления здесь может быть использована мультимодельная система.

Рассмотрим вариант, когда взаимодействуют три модели, соответствующие номинальной, увеличенной и уменьшенной массе шарика. Соответственно, для каждой модели синтезируется модальный регулятор с параметрами $k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}, k_{4i}$:

$$u_i(t) = k_{1i}\dot{e}(t) + k_{2i}\ddot{e}(t) + k_{3i}p(t) + k_{4i}\dot{p}(t) \quad i = 1, 2, 3.$$

Общий сигнал управления вырабатывается по формуле дефазификации:

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_{T_i}(E(t)) u_i}{\sum_{i=1}^3 \mu_{T_i}(E(t))} = w_1 u_1 + w_2 u_2 + w_3 u_3, \quad (2)$$

где $\mu_{T_i}(p(t))$ – степень принадлежности входного значения к i -й нечеткой области; w_i – весовой коэффициент i -го нечеткого регулятора.

Текущая ошибка управления $E(t)$ описывается формулой:

$$E(t) = \alpha e(t) + \beta \dot{e}(t) + \gamma \int e(t) dt, \quad (3)$$

где α, β, γ – константы, $e(t)$ – ошибка выхода по отношению к эталонному процессу, использованному при синтезе модальных регуляторов.

Для расчета значений $\mu(E)$, входящих в (2), необходимо описать ошибку выхода каждой модели по отношению к эталону. Для этого можно использовать три терма (рис. 4).

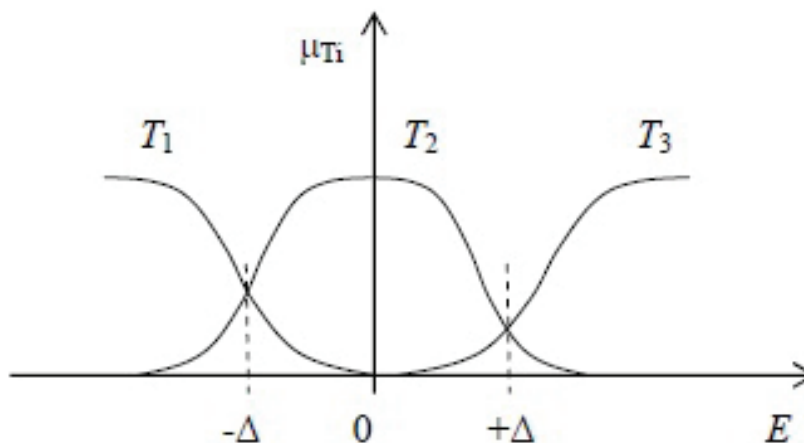


Рис. 4. Лингвистическое описание ошибки выхода модели

Окончательно структура адаптивной мультимодельной системы приобретает вид, показанный на рис. 5 (где МР – модальный регулятор).

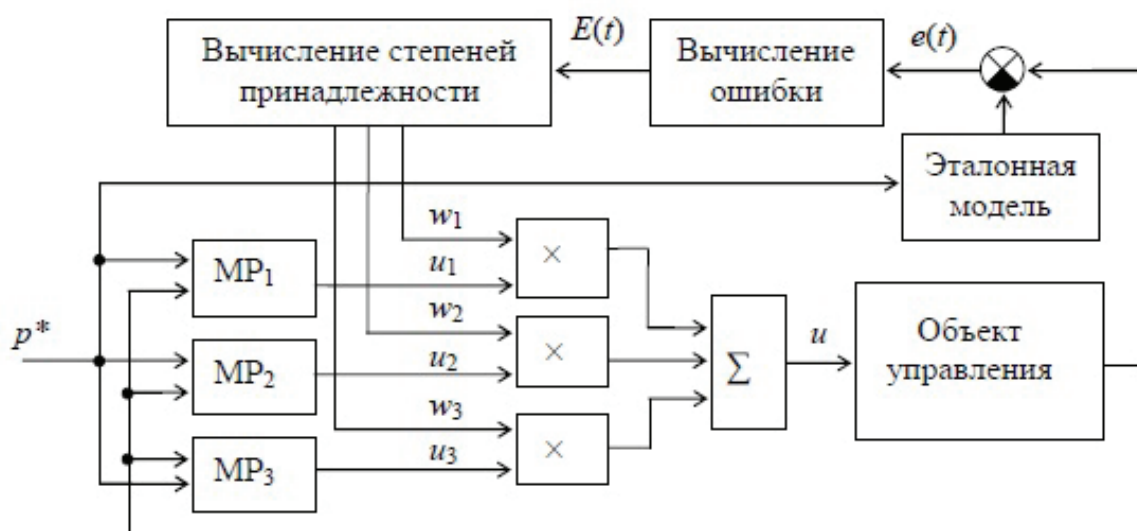


Рис. 5. Мультимодельная адаптивная система

Таким образом, в рассмотренном примере организации мультимодельной адаптивной системы за счет использования лингвистического описания удалось заменить выходы моделей на соответствующие нечеткие множества (рис. 4). В более сложных случаях блок вычисления степеней принадлежности (рис. 5) должен содержать набор моделей, соответствующих набору используемых регуляторов.

На рис. 6 представлен результат моделирования адаптивной системы.

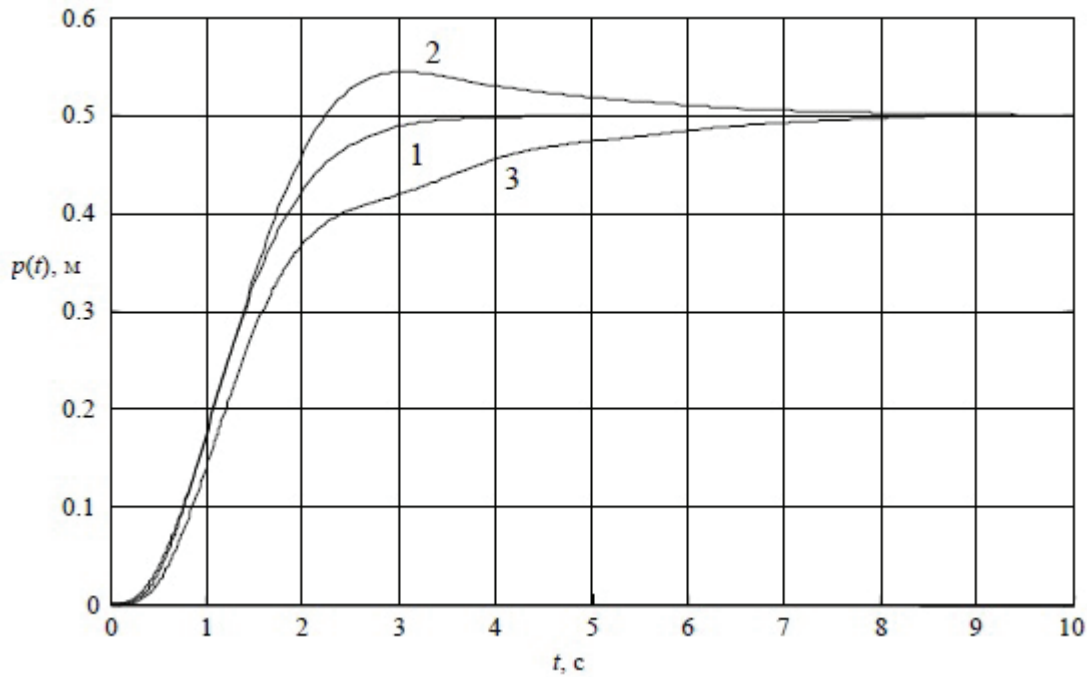


Рис. 6. Результат работы адаптивной системы

Сравнение рис. 6 и рис. 3 показывает, что статическая ошибка полностью устраняется при изменении параметров системы в широком диапазоне.

Рассмотренная структура содержит параметры α , β , γ и Δ , которые нельзя рассчитать аналитически, однако их легко определить с помощью оптимизационной процедуры, например – с помощью генетического алгоритма.

Рассмотренный подход к организации мультимодельной системы может быть использован при построении адаптивных систем управления для широкого класса динамических объектов.

Литература

1. **Murray-Smith R., Johansen T.A.** Multiple Model Approaches to Modelling and Control. Tylor & Francis, London, 1997.
2. **Narendra K.S., Balakrishnan J.** Adaptive control using multiple models. IEEE Transactions on Automatic Control, 42(2), 1997. P. 171–187.
3. **Narendra K.S., Balakrishnan J., Ciliz M. K.** Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning. IEEE Control Systems Magazine, 15(3), 1995. P. 37–51.
4. **Mamdani E.H., Assilian S.** An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. №1. P.1–13.
5. **Бураков М.В.** Механизм адаптации нечеткого регулятора // Известия Академии наук, Теория и системы управления. 1998. №1. С.84–87.
6. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. Systems Man Cybernet. 1985. Vol.15, № 116. P. 116–132.
7. **Бураков М.В., Брунов М.С.** Структурная идентификация нечеткой модели // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 3(34). С. 232–246.
8. **Salem F. A.** Mechatronics Design of Ball and Beam System: Education and Research // Control Theory and Informatics. Vol.3, No.4, 2013. P. 1 26.
9. **Бураков М.В.** Генетический алгоритм: теория и практика // СПб: ГУАП, 2008 г. 164 с.