

## Раздел V. Моделирование сложных систем

УДК 681.51.01(075.8)

**В.И. Финаев, И.С. Коберси**

### **АДАПТИРУЕМОСТЬ И НАБЛЮДАЕМОСТЬ ГИБРИДНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ**

В теории управления особое внимание уделяется задачам синтеза математических моделей и алгоритмов управления при недостаточной информации об объекте управления и действующих на него управляющих и возмущающих сигналах. Опыт создания систем автоматического управления для сложных технологических объектов, в условиях большой неопределенности и неполноты знаний об объекте, нечеткости описаний показал неэффективность применения только формальных классических методов теории управления.

Субъективная вероятность Севеджа, верхние и нижние вероятности Демпстера, характеризующие неопределенность в теории вероятностей, правдоподобие и доверие Шеффера и, наконец, теория нечетких множеств Заде – это неполный список направлений, ориентированных на моделирование на основе экспертных знаний и принятие решений в условиях нечеткости и неопределенности [1].

Для эффективного функционирования систем управления целесообразно применять системы с элементами искусственного интеллекта. Это позволит на основе работы моделей искусственного интеллекта разрабатывать нечеткие контроллеры (регуляторы). Применение искусственного интеллекта не означает отказ от традиционных методов управления, основанных на применении моделей динамических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями. Модели искусственного интеллекта дополняют традиционные подходы к моделированию систем управления и позволяют создавать модели гибридного интеллекта.

На практике одноступенчатый регулятор работает удовлетворительно в одном операционном режиме, но не во всех режимах. Например, регуляторы типа-ПД обычно не могут поддерживать статическую точность, если они управляют статическим управляющим процессом, тогда как регулятор ПИД-типа могут делать это очень хорошо. Структура нечеткого регулятора приведена на рис. 1.

На рис. 1 показана структура гибридного нечеткого регулятора, полученного из ПИД-регулятора, и обучаемого нечеткого регулятора, которые работают в адаптивной системе управления, для которых рассматривается в отдельности синтез адаптируемости.

Нечеткие регуляторы подразделяют на три типа: логико-лингвистические регуляторы (ЛЛР); аналитические регуляторы; обучаемые нечеткие регуляторы.

Обучаемые нечеткие регуляторы и системы управления относятся к классу наиболее перспективных [2]. Они сохраняют высокую работоспособность в условиях помех и погрешностей измерения и достаточно быстро настраиваются на меняющиеся условия производства, снижая тем самым потери от неэффективного управления.

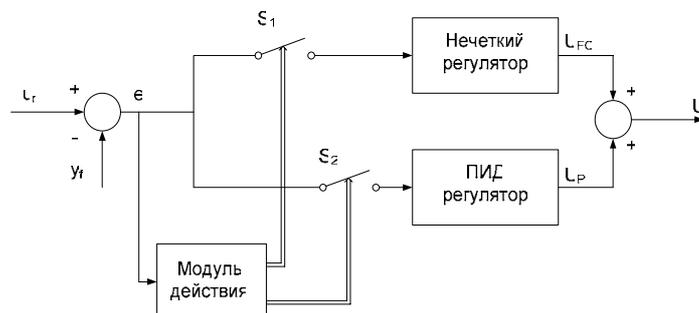


Рис. 1. Состав гибридного регулятора

Основные недостатки обучаемых систем управления связаны с применением ВР-метода, а именно: локальный характер поиска и частое «зацикливание», присущие градиентным методам; требование непрерывности и дифференцируемости функций принадлежности; не определяются порядок  $(r,s)$  и количество правил  $n$ . Для устранения «зацикливания» рекомендуется генетическим алгоритмом менять (встряхивать) размер рабочего шага  $h$  в формуле градиентов и компоненты вектора  $s$ . Другие исследователи считают, что для целей обучения достаточно применять только генетические алгоритмы, позволяющие преодолеть первые два недостатка ВР-метода.

Наибольший эффект был достигнут при гибридном обучении, осуществляемом генетическим алгоритмом, уточняющим параметры функций принадлежности  $d$ , совместно с многошаговым методом наименьших квадратов. При таком подходе удалось в значительной мере устранить все недостатки ВР-метода.

Гибридный регулятор работает как многорежимный регулятор, который имеет три режима операций, управляемых режимом операции модуля действия. Изменение режимов зависит от величин нечетких вводов регулятора в зависимости от того – установятся ли следующие отношения [3]:

- 1)  $e(k) \in ZE$  and  $\Delta e(k) \in ZDE \Rightarrow S_1 = OFF, S_2 = ON$ ;
- 2)  $e(k) \notin ZE$  and  $\Delta e(k) \in ZDE \Rightarrow S_1 = ON, S_2 = ON$ ;
- 3)  $\Delta e(k) \in ZDE \Rightarrow S_1 = OFF, S_2 = OFF$ ,

где  $ZE$  и  $ZDE$  – нулевые нечеткие подмножества нечетких вкладов регулятора;  $e(k)$  – сигнал ошибки.

Рассмотрим задачу анализа адаптируемости ПИД-регулятора для непрерывного многосвязного динамического объекта.

Предположим, что непрерывный линейный нестационарный обобщенный объект управления, включающий линейные приводы, многосвязный объект управления и датчики, описывается системой уравнений вида [3]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B(t)u, & x(t_0) &= x_0, & u(t_0) &= u_0, \\ y &= C(t)x + \Theta, & \Theta(t_0) &= \theta_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x$  – вектор состояния объекта управления,  $x \in \mathbb{R}^n$ ;  $y$  – вектор выхода объекта,  $y \in \mathbb{R}^m$ ;  $m \leq n$ ;  $u$  – векторы управления и возмущающего воздействия;  $u \in \mathbb{R}^m$ ,  $\Theta \in \mathbb{R}^m$ .

Пусть матрицы параметров объекта  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  заданы в классе кусочно-непрерывных матриц вида (допустимое множество):

$$\{A(t), B(t), C(t)\}_o = \{\|A(t)\|, \|B(t)\|, \|C(t)\| < \infty\}. \quad (2)$$

Предположим, что обобщенный объект полностью управляемый, идентифицируемый и не полностью наблюдаемый, а ПИД-регулятор стабилизирует объект управления.

Основной контур адаптивной системы управления, описываемый уравнениями (1) называется частично адаптируемым по выходу системы для ее входа, если любой тройке матриц  $A, B, C \in \{A, B, C\}_o$  соответствует единственная совокупность матриц  $\tilde{G}_1^*, \tilde{G}_2^*, \tilde{G}_3^*$ , для которой имеет место:

$$I(A, B, C, \tilde{G}_1^*, \tilde{G}_2^*, \tilde{G}_3^*) = \min_{\tilde{G}_1^*, \tilde{G}_2^*, \tilde{G}_3^*} I.$$

где  $I$  – функционал.

Назовем матрицами адаптируемости блочные матрицы вида:

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} \tilde{L}_{11} & \tilde{L}_{12} & \tilde{L}_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{L}_{2n+2,1} & \tilde{L}_{2n+2,2} & \tilde{L}_{2n+2,3} \end{bmatrix}, \quad \tilde{N} = \begin{bmatrix} \tilde{N}_1 \\ \vdots \\ \tilde{N}_{2n+2,2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Свойство адаптируемости, в общем случае, зависит не только от обобщенного объекта, т.е. от динамических характеристик привода, самого объекта и датчиков, но и от структуры и параметров самого регулятора. Для того чтобы обеспечить различные типы адаптируемости регулятора, необходимо так построить процедуру его синтеза, чтобы выполнялись условия, которые полностью вытекают из структурных свойств матриц адаптируемости [4].

Рассмотрим свойства адаптируемости нечеткого регулятора в составе гибридного регулятора. Для исследования его свойства необходимо получить от экспертов предполагаемые условия об изменения параметров объекта управления и, поскольку выбранный нечеткий регулятор является обучаемым, это значит, что регулятор должен подстраиваться под параметрами самого объекта управления. С этой целью при изменении рассчитанных коэффициентов объекта управления в ПИД-регуляторе происходит переключение в гибридном регуляторе с ПИД-регулятора на обучаемый нечеткий регулятор для поправки работы ПИД-регулятора и обеспечение надежности работы объекта управления с выбранными его параметрами.

Структурная схема гибридного регулятора представлена на рис. 2.

Обычный ПИД-регулятор настраивает измененный коэффициент в зависимости от величины ошибки  $e(t)$ . Если величина ошибки  $e(t)$  невелика, то в гибридном регуляторе используется величина измененного коэффициента, принятая для обычного ПИД-регулятора. При больших значениях величины ошибки  $e(t)$  скорость изменения измененного коэффициента уменьшается.

После определения параметров нечеткого контроллера необходимо ввести лингвистические переменные экспертами в зависимости от величины ошибки  $e(t)$ , после этого необходимо привести изменения сигнала управления  $u(t)$  для ПИД- и гибридного регуляторов [5].

После того, как ввели лингвистические переменные, необходимо для каждой лингвистической переменной определить терм-множество для каждого параметра. Если ПИД-регулятор настраивает эти коэффициенты, то в гибридном регуляторе эти коэффициенты задаются.

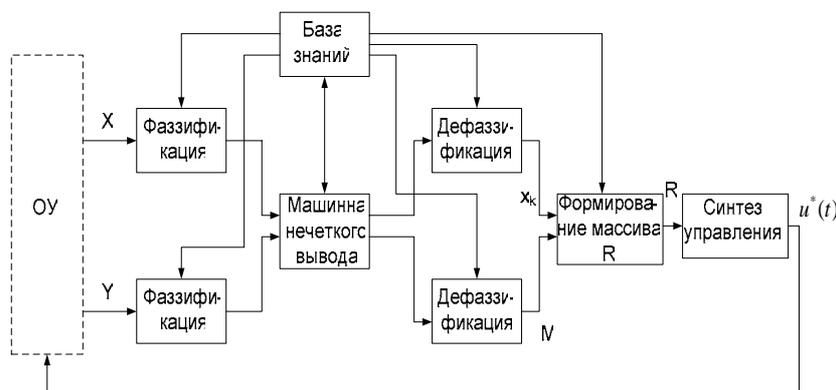


Рис. 2. Структурная схема гибридного регулятора

Измерение, наблюдение является необходимой составной частью управления. Даже тогда, когда формируются, так называемое, программное управление – функция времени, определяемая на стадии проектирования, исходным является измерение, дающее необходимую информацию об управляемом процессе. Связь управления с информацией, получаемой посредством измерения, является ограниченной и может быть положена в основу определения понятия управления.

При автоматическом управлении предполагается, наблюдение сопровождается измерением координат, параметров. Под наблюдаемостью понимается возможность косвенного определения величин на основе измерения некоторых величин и исполнения априорной информации. Косвенные измерения широко известны из классической метрологии.

В теории управления под наблюдаемостью понимается возможность косвенных измерений, но в расширенном по сравнению с традиционной метрологией смысле.

Объект называется наблюдаемым, если по результатам измерения векторов  $y(t)$  и  $u(t)$  на интервале  $[0, t]$  можно определить значение вектора  $x(t)$  при  $0 \leq t_1 \leq t$ . В противоположном случае объект называется не вполне наблюдаемым.

Изучение наблюдаемости, как других свойств систем, нуждается в критериях, условиях, которые позволяли бы судить о наблюдаемости на основе некоторых правил, оперирующих априорной информации (заданным условиям). Эти критерии и составляют основное содержание теории наблюдаемости.

Для исследования свойства наблюдаемости объектов управления принимаются критерий наблюдаемости, и они выполняются в соответствии с критерием Коши для определения  $y(t)$  при  $t > 0$  достаточно найти его нулевые значения  $x(0)$ .

$$x(t) = e^{At} x_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau,$$

где  $A, B$  – известные матричные параметры системы;  $u(\tau)$  – это управление, которое переводит состояние  $x_0$  в состояние  $x(t_1)$  при  $t=t_1$ .

Для исследования свойства наблюдаемости достаточно оценить возможность определения  $x_0$  по  $y(t)$  и  $u(t)$ . В соответствии с критерием наблюдаемости Калмана для этой цели используется матрица наблюдаемости [6].

Если известна матрица Коши системы, то условие полной наблюдаемости на интервале времени заключается в невырожденности матрицы. Эти условия непосредственно получаются из общего решения однородного линейного некоторого

дифференциального уравнения с учетом восстановления  $x(t_0)$  по наблюдению на интервале времени  $[t, t_0]$ .

Применение гибридных регуляторов придает системам управления свойство невосприимчивости к изменениям параметров объекта и внешним возмущениям. Функциональные характеристики гибридного регулятора существенно расширяются, если обеспечить возможность коррекции функций принадлежности и параметров модели в базе знаний с использованием режима удаленного доступа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов О.А. Гибридный регулятор для энергосберегающего управления электрокамерными печами // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005, № 7.
2. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под редакцией А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987.
4. Деменков Н.П. Адаптивное управление с помощью нечетких супервизоров // Промышленные АСУ и контроллеры. – 1999, № 4.
5. Финаев В.И. Модели систем принятия решений. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005.
6. Гайдук А.Р. Системы автоматизированного управления. Примеры, анализ и синтез. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 414 с.

УДК 539.04

**А.И. Жорник, В.А. Жорник**

#### **ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ СКАЧКООБРАЗНОМ УВЕЛИЧЕНИИ КОЛЬЦЕВОЙ ТРЕЩИНЫ В ЦИЛИНДРЕ ПРИ ЕГО ОХЛАЖДЕНИИ\***

В результате поступления тепла от потока жидкости или газа в трубопроводах, тепловых двигателях, выделения тепла в атомных реакторах, в проводниках при прохождении токов высокой частоты и т.д. элементы этих конструкций работают в условиях неравномерного нестационарного охлаждения. Следствием этого является возникновение градиентов температур, сопровождающихся неодинаковым тепловым расширением отдельных частей конструкций. Во всех случаях неравномерное тепловое расширение вызывает температурные напряжения, которые, усиливаясь вблизи различных дефектов, могут вызывать разрушение конструкции из материалов с повышенной хрупкостью.

В работе [1] рассматривалась нестационарная квазистатическая задача термоупругости для сплошного цилиндра радиуса  $r_c$  неограниченной длины со свободными торцами и со свободной от нагрузки соосной поперечной кольцевой трещиной радиуса  $r_d$ , выходящей на поверхность цилиндра и расположенной в середине по длине цилиндра. Цилиндр постоянной начальной температуры  $T_0$  имеет

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) Министерства образования и науки Российской Федерации и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) (код проекта Р.Н.П. 2.22.3.10012).