

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА С ПАССИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ  
ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

**А.Г. Горюнов (Томск), В.Ф. Дядик (Томск), И.С. Надеждин (Томск), F. Manenti  
(Милан)**

**Введение**

В настоящее время в химической и атомной промышленности на любом этапе обработки (интегрированное разделение, извлечение, процессы кристаллизации для очистки U и Pu от других гибридных побочных компонентов) существует высокий уровень автоматизации. С одной стороны, все процессы должны удовлетворять высоким технологическим показателям в отношении уровня безопасности, с другой стороны, это - сложные динамические системы. Как показывает опыт, традиционные ПИД-регуляторы не обеспечивают требуемого качества управления сложными динамическими системами [1]. В последнее время проводится все больше исследований с целью разработки гибридного регулятора с нечеткой логикой на базе ПИД-регулятора, у которого настройка параметров осуществляется в режиме реального времени. Настройка нечеткого регулятора производится на базе контроллера Мамдани, используя результаты идентификации, которая осуществляется, когда неизмеримое ступенчатое возмущающее воздействие влияет на протекание процесса. Проблема идентификации привлекает большое количество научных интересов и многие методы для данной проблемы доступны в литературе [2].

Цель исследования заключается в разработке метода синтеза для нижнего уровня АСУ, которая обеспечит необходимый контроль производительности при наличии значительных изменений в параметрах процесса и ступенчатых возмущающих воздействий с неизвестными амплитудой и продолжительностью. Нижний уровень АСУ должен отвечать следующим ограничениям: управление в режиме реального времени должно выполняться с горячим резервированием контроллеров; вычислительные способности контроллеров ограничены; с целью контроля следует использовать обычные ПИД регуляторы.

**Метод нечеткого адаптивного управления с пассивной идентификацией**

Предлагаемый метод использует алгоритмы для идентификации параметров объекта в сочетании нечеткими системами, такими как контроллеры Мамдани [3]. Схема автоматической системы управления объектом представлена на рисунке 1, а схема адаптивного нечеткого регулятора показана на рисунке 2.

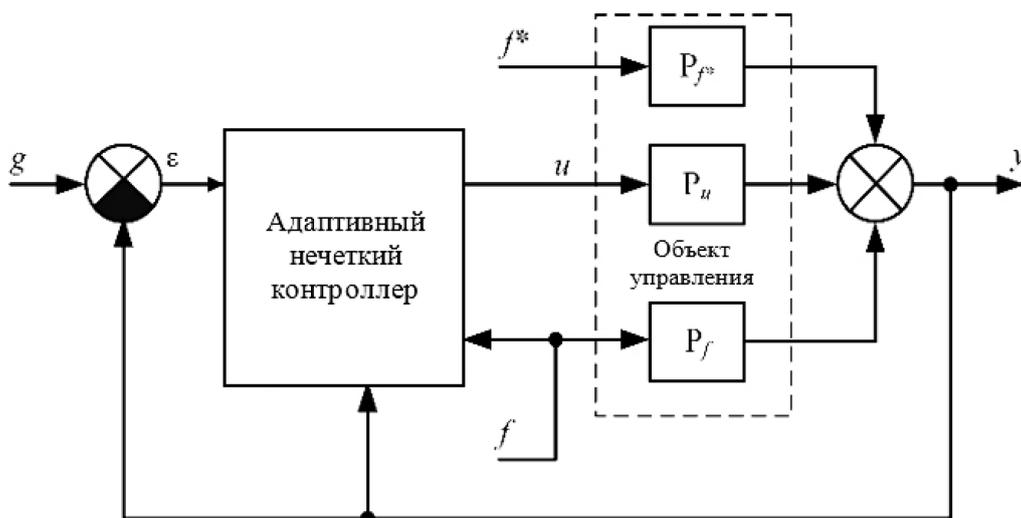


Рис. 1. Адаптивная нечеткая система управления.  $g$  : уставка;  $f^*$  : неизмеримое возмущение;  $f$  : измеряемое возмущение;  $P_u$  : канал объекта по управлению;  $P_f$  : канал объекта по возмущению;  $P_{f^*}$  : канал объекта по неизмеримому возмущению;  $y$  : контролируемая переменная;  $\varepsilon$  : ошибка управления, определяемая как  $\varepsilon = g - y$ .

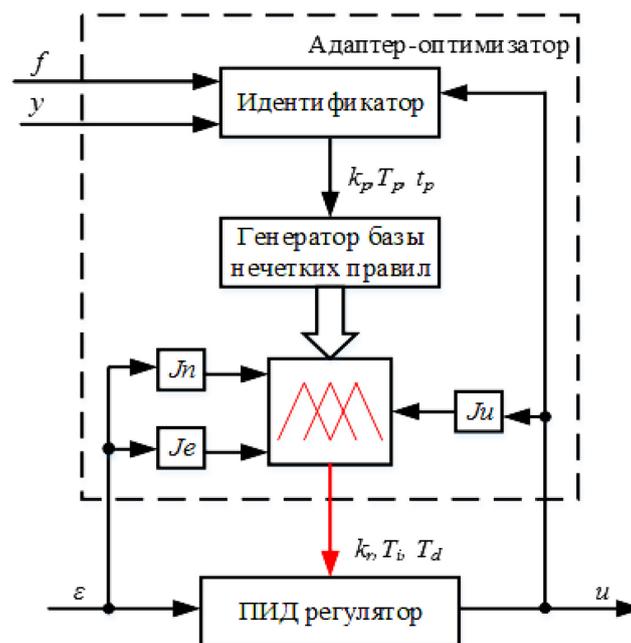


Рис. 2. Адаптивный нечеткий контроллер для автоматической системы управления

Адаптер-оптимизатор предложенной АСУ (рисунок 2) состоит из следующих блоков: идентификатор, базовый генератор нечетких правил, нечеткий контроллер Мамдани и система для расчета  $J_n$ ,  $J_e$  and  $J_u$ .

Задача оптимизации состоит в максимизации и минимизации функционала, который играет ключевую роль при настройке адаптивных и оптимальных систем управления. Оптимизируемый функционал имеет следующий вид:

$$\min(J_{e_k} + J_{u_k} + J_{n_k}) \quad (1)$$

где

$$Je_k = \sqrt{\sum_{j=k}^{k+he} (\varepsilon_j)^2} / he - 1 \quad (2)$$

$$Ju_k = \sqrt{\sum_{j=k}^{k+hu} (u_j - u_k)^2} / hu - 1 \quad (3)$$

$Jn_k$  – число ошибок управления, колеблющееся в интервале  $he$ , (2)

где  $k = 1, 2, \dots, \infty$ ,  $\varepsilon_j$  – ошибка управления,  $u_j$  – управляющая переменная,  $he$  – интервал ошибок управления  $hu$  – интервал контроля,  $j$  – индекс времени дискретизации.

Идентификация выполняется в системе с замкнутым контуром, в тот момент, когда достигается край переходного процесса (см. рисунок 3).

Изменение регулируемой переменной, вызванное неизмеримым возмущающим воздействием  $f^*$ , считается исходным сигналом для инициализации процедуры идентификации. В момент времени  $t_0$  возникает не измеряемое ступенчатое возмущающее воздействие  $f^*$  с не известными характеристиками. В момент времени  $t_1$  определяется отклонение  $y$  от  $g$  на  $\Delta y > y_g$ , где  $y_g$  – требуемая точность управления, а в момент времени  $t_2$  происходит изменение знака у переменной  $y$ . Параметры объекта управления определяются оптимизационным методом Левенберга-Марквардта. При этом, измеряются возмущение  $f$ , управляющее воздействие  $u$  и регулируемая переменная  $y$  (см. рисунки 1 – 3), которые подаются на вход идентификатора в интервале времени  $t_2$  и  $t_3$ .

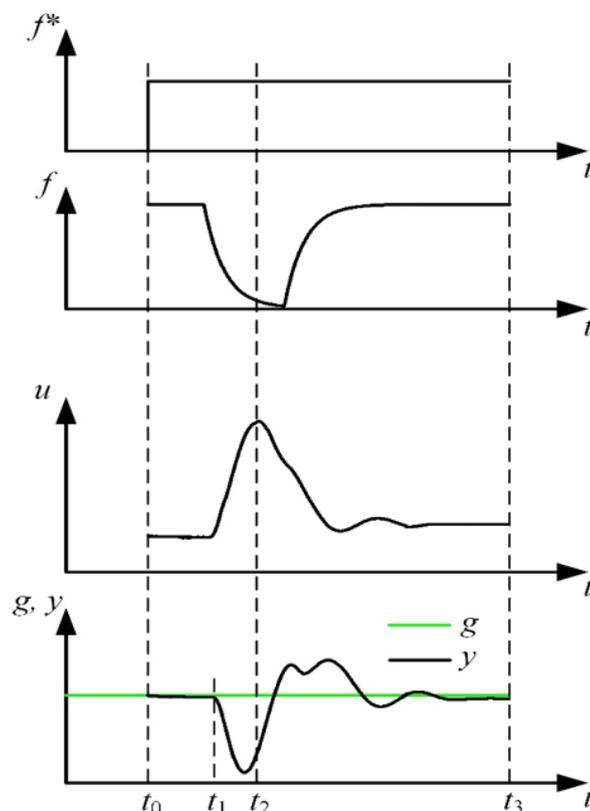


Рис. 3. Переходные процессы системы автоматического регулирования для идентификации параметров объекта управления в замкнутом контуре

Параметры передаточных функций по управлению ( $k_p$ ,  $T_p$ ,  $\tau_p$ ) и по возмущению ( $k_p^f$ ,  $T_p^f$ ,  $\tau_p^f$ ) были оптимизированы в соответствии с заявленным методом оценки итерационных

предсказаний в пакете Matlab:

$$\begin{cases} y_j^m = y_j^u(u_j, k_p, T_p, \tau_p) + y_j^f(f_j, k_p^f, T_p^f, \tau_p^f) \\ S = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_j^m - y_j)^2} / (n-1) \\ S \rightarrow 0 \end{cases} \quad (4)$$

где  $y_j^u, y_j^f$  являются цифровым представлением модели объекта управления по каналам  $u$  и  $f$ ,  $S$  оптимизируемый функционал,  $n$  доступные измерения. Динамика объекта управления описывается как линейная система с передаточной функцией  $W_p^u(s)$ , которая описывает канал по управлению  $u$  и с передаточной функцией  $W_p^f(s)$ , которая описывает канал по возмущению  $f$ :

$$W_p^u(s) = \frac{k_p}{T_p \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_p s}, \quad W_p^f(s) = \frac{k_p^f}{T_p^f \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_p^f s} \quad (5)$$

Для расчета параметров ПИД регулятора используется контроллер Мамдани с нечеткими правилами, полученными путем минимизации функционала (1). Члены функции генерируются на основании нескольких групп параметров ПИД регулятора, которые рассчитываются по нескольким разным методам.

Первая группа параметров ПИД регулятора ( $k_r, T_i, T_d$ ) рассчитывается с помощью метода оптимального модуля. Вторая группа параметров ПИД регулятора вычисляется методом AMIGO. Кроме того, параметры ПИД регулятора были определены с помощью метода, предложенного Михалевичем и др. [4].

В результате, применения базы нечетких правил Мамдани, генерируется несколько групп параметров ПИД регулятора. Этот набор правил и необходимых алгоритмов для их оценки создается в Matlab.

Цифровая реализация ПИД-регулятора описывается с помощью конечно-разностной формы:

$$\begin{cases} u_j = k_r \cdot \varepsilon_j + C_j + \frac{k_r \cdot T_d}{\Delta t} \cdot (\varepsilon_j - \varepsilon_{j-1}) \\ C_j = C_{j-1} + \frac{k_r \cdot \Delta t}{T_i} \cdot (\varepsilon_j + \varepsilon_{j-1}) \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – время дискретизации,  $k_r$  – коэффициент передачи,  $T_i$  – постоянная интегрирования,  $T_d$  – постоянная дифференцирования.  $k_r, T_i$  и  $T_d$  параметры, рассчитываются с помощью контроллера Мамдани (рисунок 2).

Адаптивный нечеткий контроллер (рисунок 2) может быть реализован в промышленном контроллере. Адаптер-оптимизатор может быть реализован в виде DLL пользовательской библиотеке для SCADA системы. Так как он не требует жесткого реального времени и работает в асинхронном режиме с ПИД-регулятором.

### Результаты применения нечеткого адаптивного управления с пассивной идентификацией в автоматизированных системах управления

На рисунке 5 показаны переходные процессы АСУ при 30 % ступенчатом возмущающем воздействии  $f$  и 30 % изменении параметров в  $W_p^u$ . Новые параметры передаточной функции объекта были определены при  $t = 0,48$  ч. (см. рисунок 4).

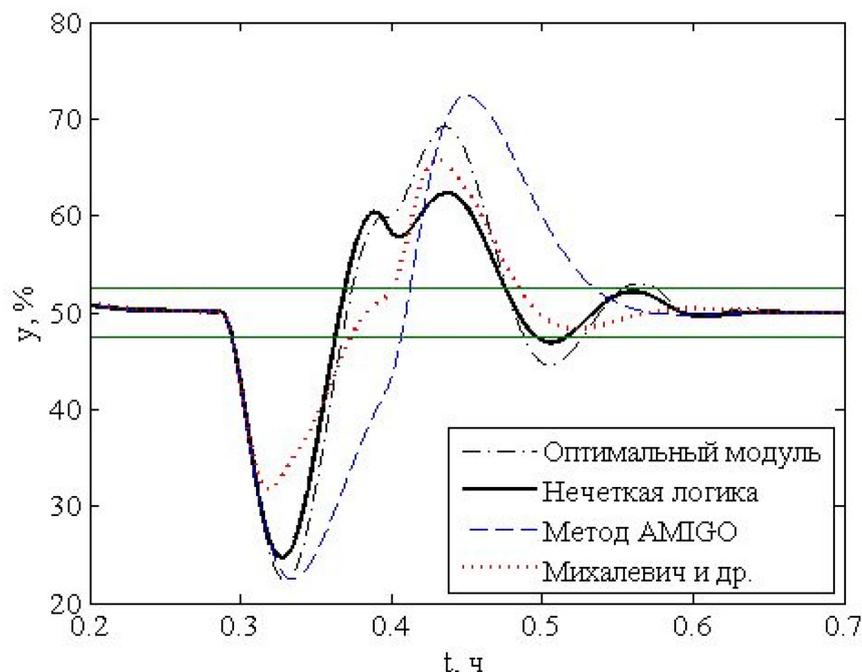


Рис. 4. Переходные процессы АСУ при 30 % ступенчатом возмущении  $f$  и 30 % изменении параметров объекта

Системы управления с ПИД регулятором, настроенным разными методами также были проанализированы с точки зрения динамических характеристик, при воздействии 30 % возмущающего воздействия и изменении параметров процесса на 30 %. Лучшими динамическими характеристиками обладала система управления с нечетким регулятором, настройка которого осуществляется в режиме реального времени, а худший показателями обладает АСУ с регулятором, настроенным методом AMIGO. Рассчитанные интегральные показатели качества (таблица 1), подтверждают сделанные выводы.

Методы настройки ПИД-регулятора	30 % ступенчатое возмущение $f$ и 30 % изменение параметров объекта	
	IAE	ISE
Нечеткая логика	2,30	32,00
Оптимальный модуль	2,91	46,81
Метод AMIGO	3,69	68,91
Михалевич и др.	2,59	34,23

Таблица 1. Интегральные показатели качества

В ближайшее время, планируется провести исследования предложенного метода на более сложных моделях процессов и установок, при подаче возмущающих воздействий, например, на моделях химических процессов [5], каскадом водоочистных установок, управлять мощностью ядерных реакторов. Кроме того, провести сравнение с упреждающим управлением (MPC) [6].

## Выводы

Предложенный метод синтеза систем автоматического управления, основанный на применении нечеткого адаптера-оптимизатора, позволит разрабатывать системы управления, которые будут обеспечивать низкую чувствительность САУ к нестабильности параметров технологических объектов управления. Идентификация параметров объекта управления осуществляется в замкнутом контуре, при наличии ступенчатых возмущающих воздействий неизвестной величины и продолжительности. Регулятор с нечеткой логикой, настраиваемый в режиме реального времени, подходит для применения при любых условиях, так как является более гибким.

#### **Благодарности**

Работа финансировалась Томским политехническим университетом в рамках федеральной программы «Наука».

#### **Литература**

1. Gao Z., Kong D., Gao C., Chen M. 2013. Modeling and control of complex dynamic systems. *Journal of Applied Mathematics*. Article number 151372. DOI: 10.1155/2012/869792.
2. Ikhouane F., Giri F. 2014. A unified approach for the parametric identification of SISO/MIMO Wiener and Hammerstein systems. *Journal of the Franklin Institute*. 351(3) 1717–27.
3. Xu X.Q. 2014. The application of MATLAB for fuzzy control system simulation. *Applied Mechanics and Materials*. 494-495 1306–9.
4. Mikhalevich S.S., Baydali S.A., Manenti F. 2015. Development of a tunable method for PID controllers to achieve the desired phase margin. *Journal of Process Control*. 25 28–34.
5. Goryunov A.G., Liventsov S.N., Rogoznyi D.G., Chursin Yu A. 2011. A dynamic model of a multicomponent no equilibrium extraction process in a pulsating column. *Radiochemistry*. 53(3) 278–83.
6. Manenti F. 2011. Considerations on nonlinear model predictive control techniques. *Computers and Chemical Engineering*. 35(11) 2491–509.