

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ОБЪЕКТОМ НА ОСНОВЕ МРС-РЕГУЛЯТОРА И ПИД-РЕГУЛЯТОРА С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

Надеждин И. С.¹, Горюнов А. Г.²

*(Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, Томск)*

Маненти Ф.³

(Миланский политехнический университет, Милан)

Как правило, в современной промышленности на любом этапе производственного процесса существует высокий уровень автоматизации. При этом технологические процессы и установки, встречающиеся в промышленности, являются нестационарными объектами управления, параметры которых могут изменяться в ходе технологического процесса. С целью повысить эффективность систем автоматического управления нестационарными объектами управления исследователи по всему миру проводят исследования, пытаясь объединить стандартный ПИД-регулятор с нечетким адаптивным контроллером. Наиболее часто настройка нечеткого регулятора производится на базе контроллера Мамдани. Кроме того, в последнее время для управления нестационарными объектами управления нашли широкое применение регуляторы на базе прогнозирующих моделей (Model Predictive Control). Данная статья посвящена сравнению систем автоматического управления нестационарным динамическим объектом на базе МРС-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой. В ходе исследований производилось изменение параметров объекта управления и подавались возмущающие воздействия определенной амплитуды и длительности. В результате были получены переходные процессы, для которых были определены показатели качества. Сопоставление и анализ полученных результатов позволили сделать заключение о преимуществах одного регулятора перед другим.

Ключевые слова: системы автоматического управления, ПИД-регулятор, регулятор с нечеткой логикой, управление с прогнозирующей моделью.

¹ Игорь Сергеевич Надеждин, аспирант (kun9@list.ru).

² Алексей Германович Горюнов, д.т.н. (alex1479@tpu.ru).

³ Флавио Маненти, к.х.н., проф. (flavio.manenti@polimi.it).

1. Введение

В настоящее время в промышленности на любом этапе обработки материала/вещества существует высокий уровень автоматизации. Использование систем автоматического управления производственными процессами обуславливается необходимостью повышения уровня безопасности протекания технологического процесса, а также повышением экономических показателей установки и производства в целом. Как правило, большинство технологических процессов (установок), встречающихся в промышленности, представляют из себя нестационарные объекты управления [4]. Нестационарности могут быть причиной изменения свойств устойчивости и даже порядка (сингулярности) динамической модели объекта [3, 5]. Как показала практика, управление такими объектами с помощью традиционных ПИД-регуляторов не позволяет добиться требуемого качества управления.

С целью повысить эффективность систем автоматического управления нестационарными объектами исследователи по всему миру занимались исследованиями, пытаясь объединить стандартный ПИД-регулятор с нечетким адаптивным контроллером [9, 15]. В настоящее время существуют различные виды нечетких регуляторов, но нечеткие регуляторы на базе ПИД-регуляторов являются наиболее распространенными [6, 8]. Как правило, настройка нечеткого регулятора производится на базе контроллера Мамдани. При этом контроллер Мамдани находится непосредственно в канале управления, как это представлено в работах [7, 14]. Для данного исследования используется нечеткий ПИД-регулятор, представленный в работе [12], но без процедуры идентификации параметров объекта управления. Отличительная особенность данного нечеткого ПИД-регулятора в том, что в нем на основе экспертных оценок определяются коэффициенты ПИД-регулятора.

Также в последнее время для управления нестационарными объектами нашли широкое применение регуляторы на основе прогнозирующей модели – MPC-регуляторы (Model Predictive Control) [11, 13]. Для синтеза такого регулятора необходимо

составить математическую модель объекта управления, на основе которой регулятор будет прогнозировать изменение контролируемой переменной на определенный промежуток времени вперед и вычислять оптимальное управляющее воздействие для обеспечения наилучшей траектории контролируемой переменной.

Цель данной работы заключается в сравнительном анализе систем автоматического управления с ПИД-регулятором на базе нечеткой логики и с регулятором на базе прогнозирующей модели (МРС-регулятор). При этом будут изменяться параметры объекта управления, а также в систему будут вноситься ступенчатые возмущающие воздействия не известной величины и длительности.

2. Теоретическая часть

2.1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассматриваются системы автоматического управления нестационарным динамическим объектом, поэтому его параметры могут изменяться в ходе режимов технологического процесса.

Динамика объекта управления описывается как линейная система с передаточной функцией $W_{p0}^u(s)$, которая характеризует канал по управлению и с передаточной функцией $W_{p0}^f(s)$, которая определяет канал по возмущению:

$$(1) \quad W_{p0}^u(s) = \frac{k_p}{T_p \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_p s},$$
$$W_{p0}^f(s) = \frac{k_p^f}{T_p^f \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_p^f s}.$$

В течение технологического процесса при переключении установки с одного режима на другой, при изменении характеристик материала (сырья) может изменяться порядок передаточной функции, описывающей объект управления по каналу управления $W_p^u(s)$. В рассматриваемом случае динамика объекта

управления будет описываться следующими передаточными функциями:

$$(2) \quad W_p^u(s) = \frac{k_p}{(T_{p1} \cdot s + 1) \cdot (T_{p2} \cdot s + 1) \cdot (T_{p3} \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau_p s},$$

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

Практическим примером рассматриваемого случая является химико-технологический процесс радиохимического производства. Имеется три технологических аппарата A , B и C . В аппаратах A и B протекает одинаковый химический процесс, но при этом концентрации химических компонентов отличаются. Соответственно на выходе аппаратов получается продукт с разными химическими свойствами. Полученный в аппаратах A и B продукт выгружают в аппарат C . Для обеспечения непрерывности химико-технологического процесса выгрузка продукта происходит поочередно: сначала из аппарата A , а затем из аппарата B . Переключение с одного аппарата на другой и нестабильность характеристик перегружаемого продукта приводит к тому, что изменяется порядок передаточной функции, описывающей аппарат C как объект управления.

Кроме изменения параметров объекта управления (изменение порядка и значений коэффициентов передаточной функции), в течение технологического процесса с систему вносятся ступенчатые возмущающие воздействия неизвестной величины и длительности.

2.2. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С МРС-РЕГУЛЯТОРОМ

Схема предлагаемой системы автоматического управления с МРС-регулятором представлена на рис. 1.

Предложенная система управления (рис. 1) была реализована в пакете MATLAB/Simulink. С помощью программного инструмента МРС Toolbox был синтезирован МРС-регулятор.

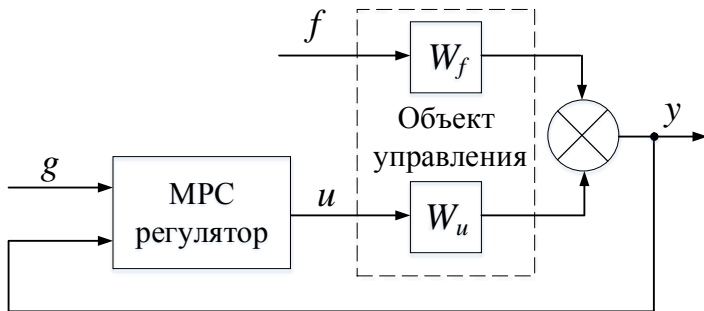


Рис. 1. Система автоматического управления с MPC-регулятором

Структурная схема реализованного MPC-регулятора представлена на рис. 2. В состав регулятора входит: прогнозирующая модель и блок оптимизации.

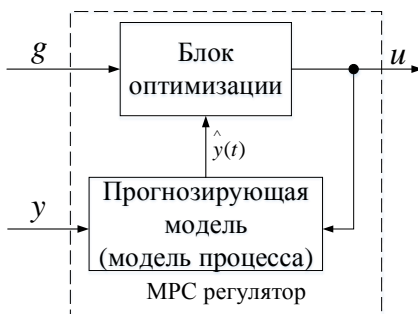


Рис. 2. Структурная схема MPC регулятора

Основную идею управления с прогнозирующей моделью можно представить следующим образом: имеются вход объекта по управлению $u(t)$ и выходная контролируемая переменная $y(t)$, $g(t)$ является желаемой величиной (зависимостью) изменения контролируемой переменной. Рассмотрим систему в дискретном времени, т.е. только в моменты времени $t = k \cdot \Delta T$, при этом ΔT – некоторый период квантования, а k – некоторое целое число. Для удобства графического представления будем считать $\Delta T = 1$.

Основной особенностью управления с помощью MPC-регулятора является наличие математической модели объекта управления (процесса, аппарата), которая достаточно точно описывает его поведение. Наличие адекватной математической модели объекта управления позволяет прогнозировать значения контролируемой переменной на определенное число шагов вперед (рис. 3).

В рамках данной работы математическая модель объекта управления была представлена передаточной функцией первого порядка (1) с определенными коэффициентом передачи и постоянной времени.

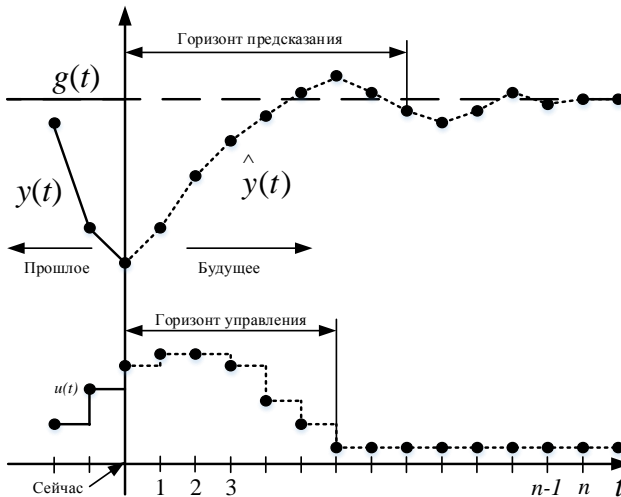


Рис. 3. Графическое представление концепции управления с помощью MPC-регулятора

Значения контролируемой переменной $y(t)$, предсказанные в некоторый момент времени t , на рис. 3 обозначены как $\hat{y}(t)$. Горизонт предсказания строится на определенное число шагов. Прогнозируемая траектория контролируемой переменной будет зависеть от значений управляющего воздействия $u(t)$.

Суть метода заключается в нахождении некоторой последовательности значений управляемой переменной $u(t)$, позволяющей обеспечить наилучшую траекторию для контролируемой переменной $y(t)$. Длина последовательности рассчитываемых управляющих воздействий $u(t)$ является фиксированной величиной и называется горизонтом управления. Искомая последовательность значений управляющего воздействия определяется в результате решения некоторой задачи оптимизации.

Для оптимизации используется целевой функционал, предложенный академиком А.А. Красовским [2]. Функционал содержит квадрат рассогласования между прогнозируемой выходной переменной объекта управления $y(t)$ и желаемой траекторией $g(t)$. При выборе оптимальных значений управляемой переменной $u(t)$ регулятор стремится минимизировать функционал, представленный выражением вида

$$(3) \quad J = \sum_{i=k}^{k+he} (g(i) - y(i))^2 + \sum_{i=k}^{k+hu} (u(i) - u(k))^2,$$

где $k = 1, 2, \dots, \infty$; he – число шагов, на которые строится прогноз поведения контролируемой переменной $y(t)$ (горизонт предсказания); hu – длина последовательности будущих значений управляющего воздействия $u(t)$ (горизонт управления).

После подачи на объект управления вычисленного оптимального управляющего воздействия $u(t)$ на следующем такте вся процедура повторяется заново с учетом вновь поступившей информации. Алгоритм функционирования MPC-регулятора представлен на рис. 4.

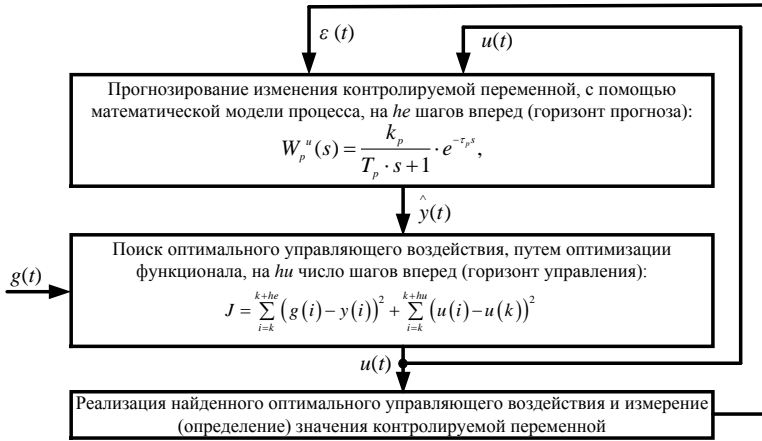


Рис. 4. Алгоритм функционирования MPC-регулятора

2.3. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКИМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Система автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором аналогична схеме с MPC-регулятором (рис. 5).

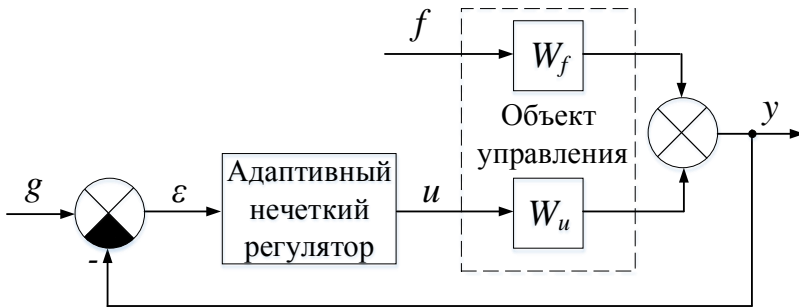


Рис. 5. Адаптивная нечеткая система автоматического управления

Показанные на рис. 5 переменные имеют следующее значение: g – уставка; f – измеряемое возмущение; u – управляющее воздействие; W_u – канал объекта по управлению; W_f – канал

объекта по возмущению; y – контролируемая переменная; ε – ошибка управления, определяемая как $\varepsilon = g - y$.

Следует более подробно рассмотреть адаптивный нечеткий регулятор, входящий в состав системы управления, представленной на рис. 5. Схема адаптивного нечеткого регулятора представлена на рис. 6.

Адаптивный нечеткий регулятор состоит из следующих блоков: генератор базы нечетких правил, нечеткий контроллер Мамдани и система для расчета J_n , J_e и J_u .

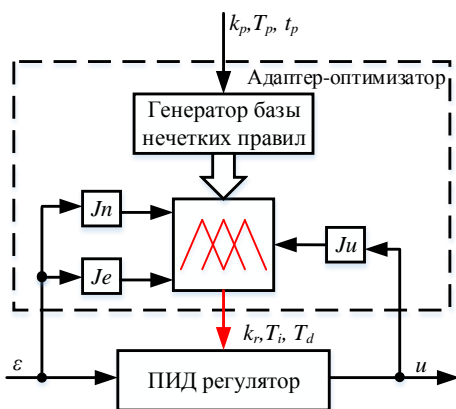


Рис. 6. Адаптивный нечеткий регулятор

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

$$(4) \quad \min(Je_k + Ju_k + Jn_k),$$

где

$$(5) \quad Je_k = \sqrt{\frac{\sum_{j=k}^{k+he} (\varepsilon_j)^2}{he - 1}},$$

$$(6) \quad Ju_k = \sqrt{\frac{\sum_{j=k}^{k+hu} (u_j - u_k)^2}{hu - 1}},$$

Jn_k – число ошибок управления, колеблющееся в интервале he , $k = 1, 2, \dots \infty$; ε_j – ошибка управления; u_j – управляющая переменная; he – интервал ошибок управления; hu – интервал контроля; j – индекс времени дискретизации.

Принцип функционирования генератора базы нечетких правил представлен на рис. 7. Параметры передаточной функции первого порядка задаются в качестве исходных данных генератору нечетких правил.

Для расчета параметров ПИД-регулятора используется контроллер Мамдани с нечеткими правилами, полученными путем минимизации функционала (4). Члены функции генерируются на основании двух групп параметров ПИД-регулятора. Первая группа параметров ПИД-регулятора (Kr , Ti , Td) рассчитываются с помощью метода оптимального модуля. А вторая группа параметров ПИД-регулятора вычисляется с помощью амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы $W_{\text{раз}}(j\omega)$. На рис. 8 представлена АФЧХ системы с разомкнутым контуром. ПИД-регулятор настраивается методом оптимального модуля (линия «Оптимальный модуль») и частотным методом (линия «Максимальный») для объекта управления, поведение которого описывается передаточными функциями первого порядка (выражения (1)). Далее происходит итерационный поиск параметров ПИД-регулятора с помощью адаптер-оптимизатора. При этом график АФЧХ разомкнутой системы должен находиться между кривыми «Оптимальный модуль» и «Максимальный» (рис. 8).

Используя обе группы рассчитанных параметров ПИД-регулятора генерируется база нечетких правил Мамдани. Этот набор правил и необходимых алгоритмов для их оценки был создан в пакете MATLAB. Конфигурация контроллера Мамдани для расчета параметров ПИД-регулятора на примере Kr представлена на рис. 9. Аналогичная конфигурация используется и для расчета Ti и Td .

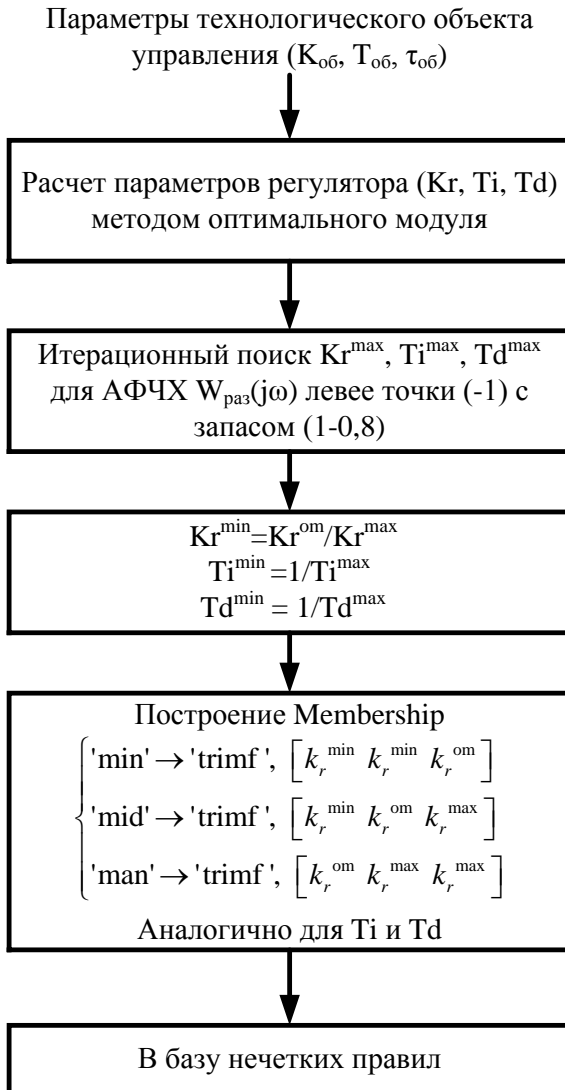


Рис. 7. Принцип работы генератора нечетких правил

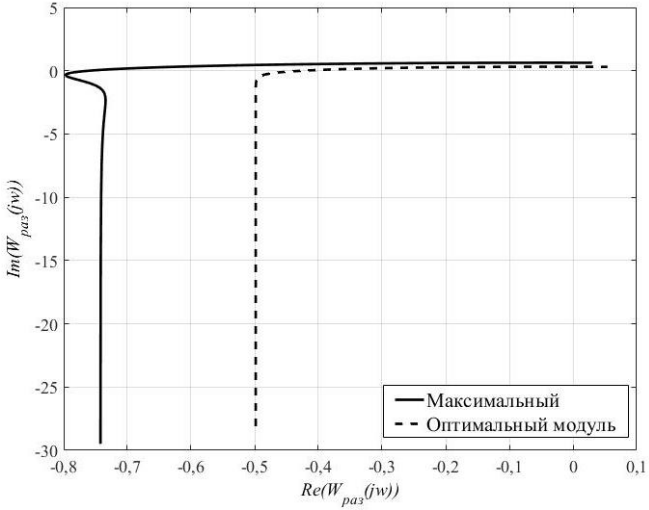


Рис. 8. Амплитудно-фазовая частотная характеристика системы с разомкнутым контуром

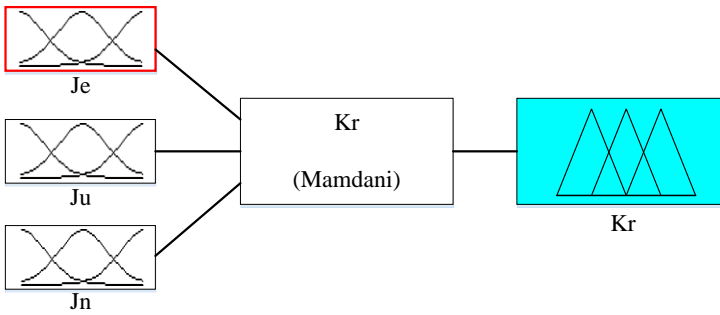


Рис. 9. Конфигурация контроллера Мамдани для вычисления параметров ПИД-регулятора в MATLAB (на примере Kr)

В общем виде ПИД-регулятор описывается функцией $W_r(s)$, представленной в виде

$$(7) \quad W_r(s) = k_r + \frac{k_r}{T_i \cdot s} + k_r \cdot T_d \cdot s,$$

где k_r – коэффициент передачи; T_i – постоянная интегрирования; T_d – постоянная дифференцирования. Параметры k_r , T_i и T_d рассчитывающиеся с помощью контроллера Мамдани (рис. 6).

Цифровая реализация ПИД-регулятора (7) описывается с помощью конечно-разностной формы

$$(8) \quad \begin{cases} u_j = k_r \cdot \varepsilon_j + C_j + \frac{k_r \cdot T_d}{\Delta t} \cdot (\varepsilon_j - \varepsilon_{j-1}), \\ C_j = C_{j-1} + \frac{k_r \cdot \Delta t}{T_i} \cdot (\varepsilon_j + \varepsilon_{j-1}); \end{cases}$$

где Δt – время дискретизации.

3. Результаты моделирования

Описанные ранее системы автоматического управления с разными регуляторами были реализованы в пакете MATLAB/Simulink. Для настройки нечеткого ПИД-регулятора в системе автоматического управления (рис. 5) были заданы параметры объекта управления, описываемого передаточной функцией первого порядка (1). Для синтеза регулятора с прогнозирующей моделью также использовалась передаточная функция первого порядка (1) с теми же параметрами, что и при настройке нечеткого ПИД-регулятора. В обеих системах автоматического управления накладывалось ограничение на управляющее воздействие.

В момент времени 0,0028 с (10 с) было задано желаемое значение для контролируемой переменной (уставка $Y = 50\%$). Полученные в результате задающего воздействия переходные процессы представлены на рис. 10.

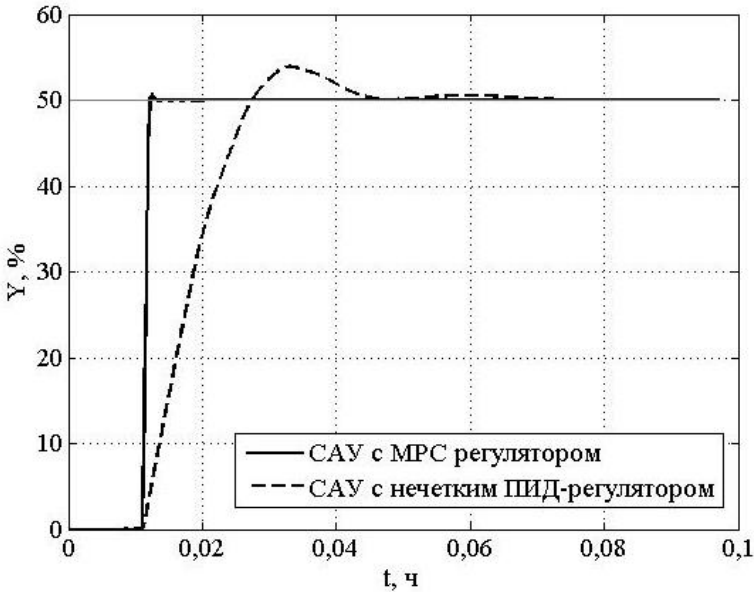


Рис. 10. Переходные процессы по задающему воздействию

Как видно из переходных процессов (рис. 10), обе системы управления выводят контролируемую переменную на заданный уровень. При этом время регулирования системы автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором составило 0,036 ч (128,9 с), а с MPC-регулятором – 0,0094 ч (34 с). Перерегулирование системы автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором составила 7,8%, а система управления с MPC-регулятором вышла на заданный уровень без перерегулирования. Также для переходных процессов, представленных на рис. 10, был рассчитан интегральный квадратичный критерий (*QIC*) качества переходных процессов по следующему выражению:

$$(9) \quad QIC = \int_{t_1}^{t_2} (g(t) - y(t))^2 dt.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Интегральные показатели качества

Регулятор	Интегральный квадратичный критерий (QIC)
Нечеткий ПИД-регулятор	$1,14 \cdot 10^5$
МРС-регулятор	$7,78 \cdot 10^4$

Проанализировав полученные показатели качества, отметим, что наилучший переходный процесс по задающему воздействию обеспечивает система автоматического управления с МРС-регулятором.

Затем в момент времени 0,14 ч в систему было внесено 30%-е ступенчатое возмущающее воздействие. Полученные переходные процессы представлены на рис. 11.

Для полученных переходных процессов (рис. 11) были определены показатели качества переходных процессов системы автоматического управления по возмущающему воздействию.

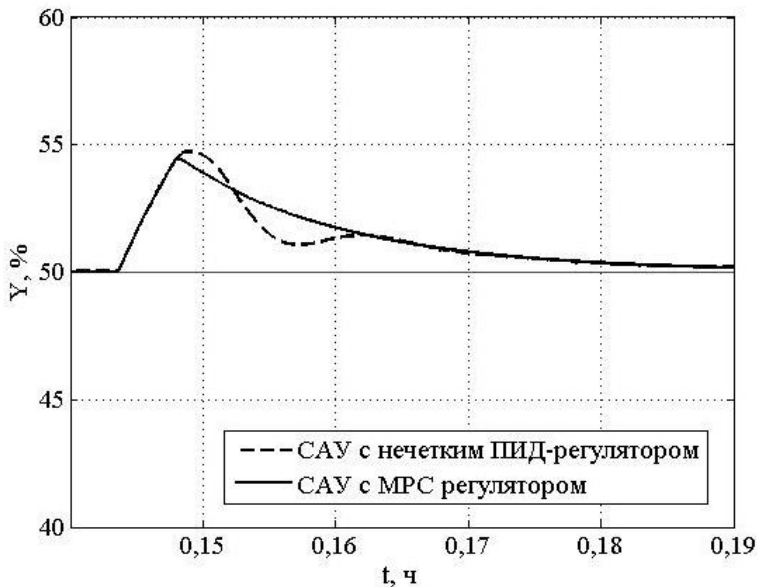


Рис. 11. Переходные процессы при 30 % ступенчатом возмущающем воздействии

Время регулирования системы автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором составило 0,0275 ч (99 с), а с МРС-регулятором – 0,0318 ч (114,48 с). Вместо перерегулирования для оценки максимального отклонения контролируемой переменной от установившегося значения рассчитали относительное максимальное отклонение по следующей формуле:

$$(10) \sigma = \frac{y_{\max}}{g} \cdot 100[\%],$$

где y_{\max} – максимальное отклонение контролируемой переменной, g – заданное значение контролируемой переменной.

Результаты расчетов представлены в таблице 2. Также для переходных процессов, представленных на рис. 10, был рассчитан интегральный квадратичный критерий качества переходных процессов по выражению (9).

Таблица 2. Показатели качества переходных процессов

Регулятор	Относительное максимальное отклонение, σ (%)	Интегральный квадратичный критерий (QIC)
Нечеткий ПИД-регулятор	9,48	$1,09 \cdot 10^3$
МРС-регулятор	8,92	$1,16 \cdot 10^3$

Анализируя полученные значения показателей качества переходных процессов можно сделать вывод, что нечеткий ПИД-регулятор немного лучше обрабатывает возмущающее воздействие.

Далее в момент времени 0,28 ч было подано 50%-е ступенчатое возмущающее воздействие и изменили порядок передаточной функции, описывающей объект по каналу управления, с первого порядка на третий (2). В момент времени 0,38 ч было подано еще одно 50%-е возмущающее воздействие, при этом контролируемая переменная еще не стабилизировалась. Полученные в результате этого экстремального возмущающего воздействия переходные процессы представлены на рис. 12.

Для полученных переходных процессов (рис. 12) также были определены показатели качества переходных процессов. Время регулирования системы автоматического управления с

нечетким ПИД-регулятором составило 0,2384 ч (858 с), а с МРС-регулятором – 0,2836 ч (1021 с).

Рассчитали относительное максимальное отклонение контролируемой переменной от заданного значения согласно выражению (10), а также определили интегральный квадратичный критерий (QIC) качества переходных процессов по выражению (9). Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Из полученных показателей качества переходных процессов очевидно, что с внесенными в систему возмущающими воздействиями лучше справляется система автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором.

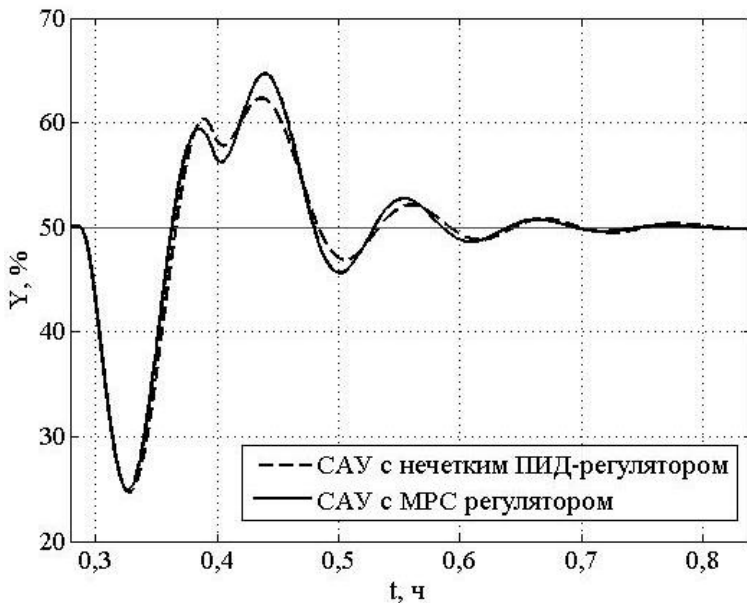


Рис. 12. Переходные процессы при 50 % ступенчатом возмущающем воздействии и изменении параметров объекта управления

Таблица 3. Показатели качества переходных процессов

Регулятор	Относительное максимальное отклонение, σ (%)	Интегральный квадратичный критерий (QIC)
Нечеткий ПИД-регулятор	50,68	$1,1543 \cdot 10^5$
МРС-регулятор	50,22	$1,1571 \cdot 10^5$

В момент времени 0,83 ч в систему было внесено 30%-е возмущающее воздействие, при этом объект по каналу управления описывался передаточной функцией третьего порядка. Так как оба регулятора были настроены на объект управления первого порядка, то качество управления несколько ухудшилось по сравнению с переходными процессами, представленным на рис. 11. Полученные переходные процессы представлены на рис. 13.

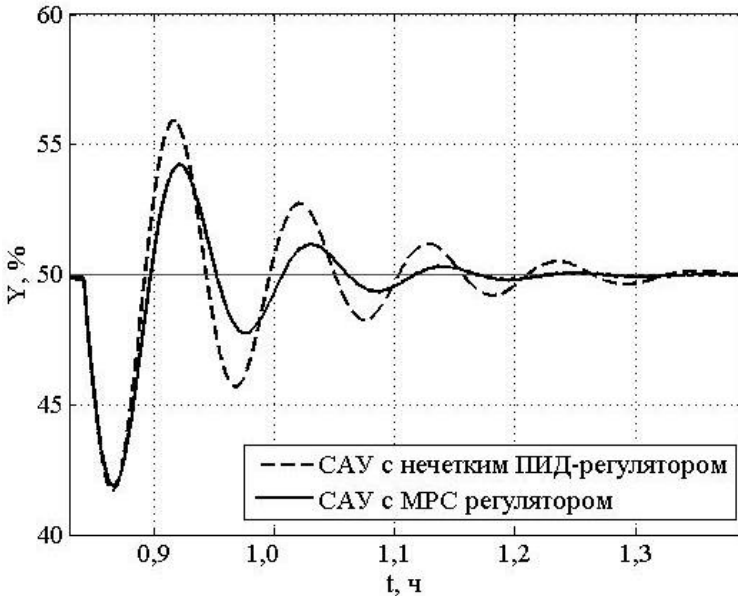


Рис. 13. Переходные процессы при 30 % ступенчатом возмущающем воздействии и новых параметрах объекта управления

Как видно на рис. 13, полученные переходные процессы отличаются наличием колебаний контролируемой переменной. Для представленных переходных процессов определили прямые показатели качества.

Время регулирования системы автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором составило 0,1957 ч (704 с), а с МРС-регулятором – 0,1053 ч (379 с).

Аналогично предыдущим опытам, рассчитали относительное максимальное отклонение контролируемой переменной от заданного значения по выражению (10), а также определили интегральный квадратичный критерий качества переходных процессов по выражению (9).

Кроме того, для оценки качества колебательных переходных процессов по возмущающему воздействию вычислили степень затухания колебаний согласно следующему выражению:

$$(11) \psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1},$$

где A_1 и A_2 – амплитуды двух соседних колебаний, направленных в одну сторону.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Показатели качества переходных процессов

Регулятор	Относительное максимальное отклонение, σ (%)	Интегральный квадратичный критерий (QIC)	Степень затухания, ψ
Нечеткий ПИД-регулятор	16,62	$1,2569 \cdot 10^4$	0,48
МРС регулятор	16,26	$9,4949 \cdot 10^3$	0,72

Рассчитанные показатели качества переходных процессов (рис. 13) численно подтверждают, что система автоматического управления с МРС-регулятором обладает значительно лучшим качеством управления.

Затем в момент времени 1,5 ч при новых параметрах передаточной функции объекта управления было подано управляющее воздействие. Желаемое значение для контролируемой

переменной было задано $Y = 60\%$. Полученные в результате задающего воздействия переходные процессы представлены на рис. 14.

Как видно из переходных процессов (рис. 14), обе системы управления выводят контролируемую переменную на заданный уровень. При этом время регулирования системы автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором составило 0,175 ч (630 с), а с МРС-регулятором – 0,120 ч (432 с).

Для полученных переходных процессов были рассчитаны прямые показатели качества такие как, максимальное отклонение контролируемой переменной от заданного значения (10), интегральный квадратичный критерий качества переходных процессов (9) и степень затухания колебаний (11). Результаты расчетов представлены в таблице 5.

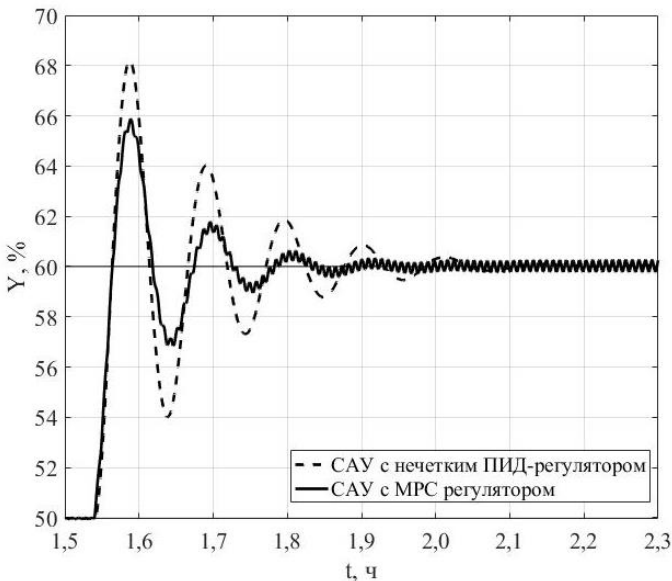


Рис. 14. Переходные процессы по задающему воздействию при новых параметрах объекта управления

Таблица 5. Показатели качества переходных процессов

Регулятор	Относительное максимальное отклонение, σ (%)	Интегральный квадратичный критерий (QIC)	Степень затухания, ψ
Нечеткий ПИД-регулятор	13,65	$1,4621 \cdot 10^4$	0,51
МРС регулятор	9,8	$1,0523 \cdot 10^4$	0,70

Полученные показатели качества переходных процессов (рис. 14) численно подтверждают, что система автоматического управления с МРС-регулятором обладает лучшим качеством управления по задающему воздействию.

4. Обсуждение полученных результатов

Сравнивая переходные процессы, представленные на рис. 10–14, и анализируя рассчитанные показатели качества для этих переходных процессов, определим регулятор, который обеспечивает наилучшее качество управления.

При выводе контролируемой переменной на заданный уровень наилучшие показатели качества переходных процессов обеспечивает система управления с МРС-регулятором. При использовании МРС-регулятора отсутствует перерегулирование контролируемой переменной (рис. 10), а также время регулирования меньше в 3,8 раза, чем при использовании нечеткого ПИД-регулятора.

Однако при внесении в систему 30%-го возмущающего воздействия были получены переходные процессы (рис. 11), демонстрирующие, что время регулирования нечеткого ПИД-регулятора в 1,15 раза меньше, чем при использовании МРС-регулятора, а также интегральный квадратичный критерий в 1,1 раза меньше. Но при этом относительное максимальное отклонение при использовании нечеткого ПИД-регулятора больше в 1,1 раза. Как видно, система управления с нечетким ПИД-регулятором обеспечивает переходные процессы с лучшими показателями.

Затем в систему было внесено 50%-е возмущающее воздействие, а также изменились параметры объекта управления и порядок передаточной функции, описывающей объект по каналу управления, с первого порядка на третий (2). По полученным переходным процессам (рис. 12) определили, что система управления с нечетким ПИД-регулятором обеспечивает в 1,2 раза меньшее время регулирования, но обладает на 0,5% большим относительным максимальным отклонением. Рассчитанные для переходных процессов (рис. 12) интегральные квадратичные критерии, представленные в таблице 3, отличаются незначительно. В данном случае система управления с нечетким ПИД-регулятором немного лучше обрабатывает возмущающие воздействия.

Далее при новых параметрах объекта управления было внесено 30%-е возмущающее воздействие. Из представленных на рис. 13 переходных процессов определили, что система управления с МРС-регулятором обеспечивает лучшие показатели качества (таблица 4). Время регулирования системы управления с МРС-регулятором в 1,86 раза меньше, чем у системы управления с нечетким ПИД-регулятором. А также меньше относительное максимальное отклонение в 1,02 раза и меньше интегральный квадратичный критерий в 1,37 раза. Кроме того, МРС-регулятор обеспечивает в 1,5 раза большую степень затухания колебаний контролируемой переменной, чем нечеткий ПИД-регулятор.

Также при новых параметрах объекта управления было подано управляющее воздействие. Из полученных переходных процессов (рис. 14) видно, что система автоматического управления с МРС-регулятором обладает лучшим качеством управления. Кроме того, это подтверждают рассчитанные показатели качества переходных процессов (таблица 5).

Таким образом, сравнивая и анализируя полученные результаты при моделировании системы автоматического управления с двумя разными регуляторами (нечеткий ПИД-регулятор и МРС-регулятор), невозможно выбрать какой-то один.

Отдельно отметим достоинства и недостатки рассматриваемых регуляторов.

К достоинствам рассматриваемого в статье нечеткого ПИД-регулятора относится возможность его реализации с помощью типовых промышленных элементов. Для этого необходим ПИД-регулятор и промышленный контроллер, в котором в виде DLL-библиотеки будет реализован адаптер-оптимизатор. Программное обеспечение контура адаптации не требует жесткого режима реального времени и может быть реализовано, например, на системе с платформой MS Windows. В этом случае также нет жесткой привязки к программному обеспечению нижнего уровня. Система управления на базе аналогичного нечеткого регулятора для управления каскадом центробежных экстракторов была реализована на радиохимическом заводе ОАО «Сибирский химический комбинат». Результаты этой работы нашли отражение в [1].

Необходимость в составлении точных и адекватных математических моделей объекта управления можно отнести к недостаткам МРС-регулятора. Во-первых, не всегда возможно составить адекватную математическую модель объекта управления, во-вторых, чем сложнее математическая модель объекта управления, тем больше вычислительных мощностей необходимо для реализации МРС-регулятора. Кроме того, МРС-подход требует существенных вычислительных ресурсов при управлении объектами, подобными рассматриваемому. Оптимизатор и прогнозирующая модель должны работать в темпе с управляемым процессом, и их затруднительно разделить на две независимые подзадачи.

5. Заключение

Данная работа посвящена синтезу и сравнению систем автоматического управления с нечетким ПИД-регулятором и с МРС-регулятором. При сравнении показателей качества, полученных переходных процессов, не удалось сделать однозначный выбор в пользу одного из сравниваемых регуляторов. Отмечены достоинства и недостатки рассмотренных регуляторов. С точки зрения практического применения и реализации рассмотренных регуляторов наиболее простым является нечеткий ПИД-

регулятор, так как для реализации этого регулятора могут быть использованы типовые промышленные элементы.

Литература

1. ГОРЮНОВ А.Г. Система автоматического управления каскадом центробежных экстракторов // Управление большими системами. – 2012. – №40. – С. 257–290.
2. КРАСОВСКИЙ А.А., БУКОВ В.Н., ШЕНДРИК В.С. Универсальные алгоритмы управления непрерывными процессами. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
3. ПОЛЯК Б.Т., ЩЕРБАКОВ П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
4. ПУПКОВ К.А., ЕГУПОВ Н.Д. Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 632 с.
5. ЦЫКУНОВ А.М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 268 с.
6. ANG L.Y., JAFAR F.A. Simulation analysis of non-linear fuzzy PID temperature controller // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 465–466. – P. 677–681.
7. EKER I., TORUN Y. Fuzzy logic control to be conventional method // Energy Conversion and Management. – 2006. – Vol. 47. – P. 377–394.
8. FERREIDOUNI A., MASOUM M.A.S., MOGHBEL M. A new adaptive configuration of PID type fuzzy logic controller // ISA Transactions. – 2015. – Vol. 56. – P. 222–240.
9. GUZELKAYA M., EKSIN I., YESIL E. Self-tuning of PID-type fuzzy logic controller coefficients via relative rate observer // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2003. – Vol. 16. – P. 227–236.
10. JOLEVSKI D., BEGO O. Model predictive control of gantry/bridge crane with anti-sway algorithm // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2015. – Vol. 29. – P. 827–834.

11. MANENTI F. *Considerations on nonlinear model predictive control techniques* // Computers and Chemical Engineering. – 2011. – Vol. 35. – P. 2491–2509.
12. MANENTI F., ROSSI F., GORYUNOV A.G., DYADIK V.F., KOZIN K.A., NADEZHDIR I.S., MIKHALEVICH S.S. *Fuzzy adaptive control system of a non-stationary plant with closed-loop passive identifier* // Resource-Efficient Technologies. – 2015. – Vol. 1. – P. 10–18.
13. NAYHOUSE M., TRAN A., KWON J.S.I., CROSE M., ORKOULAS G., CHRISTOFIDES P.D. *Modeling and control of ibuprofen crystal growth and size distribution* // Chemical Engineering Science. – 2015. – Vol. 134. – P. 414–422.
14. PANA I., DASA S., GUPTA A. *Tuning of an optimal fuzzy PID controller with stochastic algorithms for networked control systems with random time delay* // ISA Transactions. – 2011. – Vol. 50. – P. 28–36.
15. SIDDIQUE N. *Fuzzy control* // Studies in Computational Intelligence. – 2014. – Vol. 517. – P. 95–135.

CONTROL SYSTEMS OF A NON-STATIONARY PLANT BASED ON MPC AND PID TYPE FUZZY LOGIC CONTROLLER

Igor Nadezhdin, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Ph.D. student (kun9@list.ru).

Aleksey Goryunov, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Ph.D., Head of Department (alex1479@tpu.ru).

Flavio Manenti, Polytechnic University of Milan, Milan, professor (flavio.manenti@polimi.it).

Abstract: Currently in the industry, at any stage of production process there is a high level of automation. As a rule, the majority of technological processes, occurring today in the industry, are non-stationary control objects. In order to improve the efficiency of automatic control system of non-stationary control object, researchers around the world, doing research, trying to combine the standard PID regulator with fuzzy adaptive controller. As a rule, setting a fuzzy controller is made

based on the Mamdani controller. Also, recently, for the control of non-stationary control object are widely used controllers on the basis of a predictive model. The purpose of this paper is the comparative analysis of automatic control systems with PID regulator based on fuzzy logic and regulator on the basis of a predictive model (MPC-controller). In the course of research, stepwise disturbance of a certain amplitude and duration were applied to the control object. As a result, transient processes were obtained and quality indicators were determined. By comparing and analyzing the results obtained, a conclusion was made about the advantages of one controller over another.

Keywords: automatic control system, PID controller, fuzzy logic controller, model predictive control.

УДК 681.5

ББК 32.965, 32.966

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.П. Курдюковым.*

Поступила в редакцию 02.06.2016.

Опубликована 30.09.2018.