

# МОДЕЛЬ БЫСТРОГО ФАЗИ-КОНТРОЛЛЕРА

К.т.н., доц. Усенко В.В.

Moscow Power Engineering Institute (Technical University)

Tel.: 095 362 7720, Fax: 095 273 3482, E-mail: [yvu@control.ru](mailto:yvu@control.ru)

**Аннотация.** Сегодня большинство промышленных приложений нечеткого управления базируется на контроллерах двух типов Mamdani или Takagi-Sugeno. Большинство из них содержат типовые процедуры, свойственные традиционным нечетким контроллерам: фазификацию, агрегацию, импликацию, аккумуляцию и дефазификацию. В этой статье предлагается модель быстрого нечеткого контроллера, который базируется на идее нахождения прямой связи между входными и выходными термами, минуя громоздкие промежуточные процедуры синтеза традиционных нечетких контроллеров. Непосредственная реализация указанной идеи производится с помощью многомерного метода наименьших квадратов, применяемого при построении статических моделей в теории планирования экспериментов. Излагается идея построения интегрированной системы управления состоящей из автономных одноцелевых подсистем.

**Ключевые слова:** фазы алгоритм, фазы контроллер, быстрый фазы контроллер, пространство управления, быстроедействие фазы контроллеров, многоцелевые системы управления.

В 1965 г. с момента публикации работы L.A.Zadeh стартовала фазы теория, благодаря которой появилась возможность общения человека с компьютером на естественном языке и одновременно, открылись перспективы использования качественной информацией в управлении техническими объектами [12]. Эта же теория послужила инструментом для развития большинства сфер человеческих знаний. Знаменательно, что первые практические результаты были получены в теплоэнергетике. Это случилось в 1974, когда доктор Mamdani E.H. из Лондонского Университета применил фазы теорию при автоматизации парового котла и турбины [1]. В 1980 году Smidth F.L. из Дании использовал фазы алгоритм при автоматизации цементной печи. В настоящее время отмечено более 600 случаев применения фазы-управления в промышленности, которые в основном сконцентрированы в Японии [2]. В этой стране к концу 1985 г. фазы-технология вошла в быт. На основе фазы-микропроцессоров и специальных фазы-датчиков налажено производство полностью автоматизированных стиральных машин и пылесосов. Рекордным стал 1988 год, когда было продано более 4.5 млн. стиральных машин и более чем 5.5 млн. пылесосов [2]. Совсем недавно вышел сборник трудов посвященных применению фазы-управления на электрических станциях [13]. Все эти факты являются хорошей приметой для более внимательного изучения и применения фазы-технологии на практике.

В мировой практике существует большое разнообразие нечетких контроллеров. Число способов их реализации давно превысило цифру 100, но разработка новых методов и новых типов фазы-контроллеров продолжается. В последние годы интенсивно ведутся работы по реализации так называемых фазы ПИД контроллеров, особенно их гибридных вариантов [2-5]. Большинство из них напоминают мифических кентавров, так как они не выдерживают серьезной критики. В них качество работы четких и нечетких контроллеров оценивается по реакции системы регулирования на изменение задания. Как известно, о качестве работы контроллеров следует судить по их способности обрабатывать возмущения, поступающих на систему [6].

Привлечение к настройке фазы ПИД контроллеров генетических алгоритмов [3,5] не решают проблему, наоборот, это Сизифов труд (большие вычислительные затраты при заранее неверно сформулированной цели). Одним из основных недостатков существующих фазы-контроллеров и без затратных генетических методов является медлительность их работы. В данной работе предлагается метод повышения быстрогодействия фазы контроллеров.

Рассматривается пример четкой одноконтурной системы автоматического регулирования с ПИ законом регулирования. Передаточная функция объекта равна:

$$W_0(s) = 2.5 / [(10s + 1)^2(15s + 1)] \quad (1)$$

Дискретный вариант традиционного ПИ регулятора реализуется с помощью следующего алгоритма:

$$u_k = u_{k-1} + du_k = u_{k-1} + k_r de_k + k_i e_k \quad (2)$$

где  $e_k$ ,  $de_k$  – дискретные значения ошибки регулирования и ее производной;  $u_k$ ,  $du_k$  – значение выходной величины исполнительного механизма и ее приращение.

Расчетные значения параметров настройки регулятора соответствующие степени затухания  $\Psi = 0.9$  равны  $k_r = 0.78$ ;  $k_i = 0.04$ . При реализации дискретного варианта алгоритма выбран шаг квантования равный  $dt = 0.05$ .

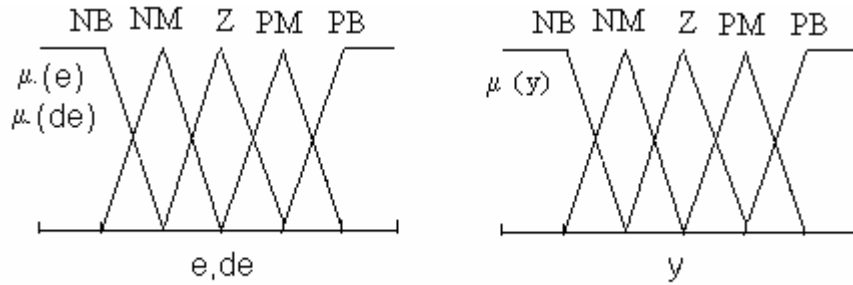


Рис.1

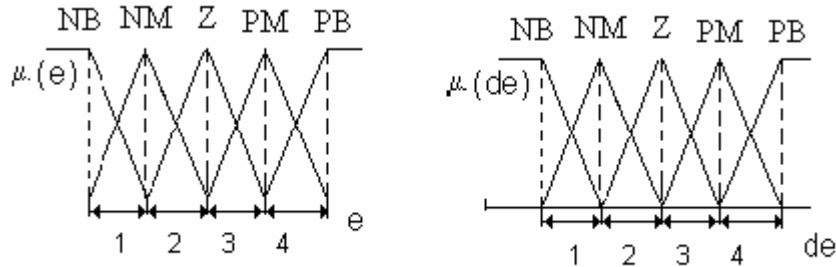


Рис.2

Обычно нечеткие контроллеры и в частности фазы – ПИ и ПИД алгоритмы реализуются с помощью термов, функции принадлежности которых имеют триангулированную форму. В нашем случае таких термов пять рис.1. Следует отметить, что это далеко не единственный способ фазификации термов. Можно привести большое количество работ, где используются самые различные формы описания термов. Например, управления скоростью автомобиля разработана система управления с нечетким нелинейным ПИД контроллером, в котором использовано всего два входных и два выходных терма [15]. Функции принадлежности входных термов аппроксимировались в виде арктангенсов, а выходные термы – линейными функциями:

$$\begin{aligned} \mu_P(e) &= a \cdot \arctg(b \cdot e) + 0.5 & \mu_N(e) &= a \cdot \arctg(-b \cdot e) + 0.5 \\ \mu_P(u) &= c \cdot u + 0.5 & \mu_N(u) &= -c \cdot u + 0.5 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $a, b, c$  – параметры настройки нечеткого ПИД контроллера.

При сравнении работы фазы-контроллеров с традиционными аналогами первые из них обычно проигрывают в быстродействии. Одной из причин является то, что количество операторов при реализации фазы-контроллеров, по меньшей мере, на порядок больше, чем при реализации четких контроллеров [6], хотя квалификация программистов в этих случаях занимает не последнее место.

Заключительной процедурой синтеза любого нечеткого контроллера является определение значения управляющего сигнала. Чаще всего эта процедура осуществляется с помощью метода центра тяжести, в соответствии с которым управляющее воздействие вычисляется как абсцисса центра тяжести площади фигуры, образованной функцией принадлежности  $\mu(y)$  и осью  $y$ . Использование этого метода приводит к большим затратам времени, кроме того в результате его применения система становится нелинейной. Для увеличения скорости вычислений продуктивной идеей оказалось сведение многошаговой инференц-процедуры и дефазификации в единую формулу [8]

$$y = \frac{\int m(y) \cdot y \cdot dy}{\int m(y) \cdot dy} = \sum_{j=1}^r \prod_i^m m_{i,j}(x_i) w_j \quad (4)$$

Однако здесь сложность вычислений запрятана в неопределенность вычисления весовых коэффициентов  $w_j$ , что затрудняет использование этого метода.

Для увеличения скорости вычислений в последнее время применяется метод замены интегралов в формуле (4) на вычисление средневзвешенного значения или метод весов [11]:

$$y = \frac{a_1 m_{PB} + a_2 m_{PM} + a_3 m_Z + a_4 m_{NM} + a_5 m_{NB}}{m_{PB} + m_{PM} + m_Z + m_{NM} + m_{NB}} \quad (5)$$

где  $a_1 \dots a_5$  – базовые значения термов  $PB \dots NB$ ;  $m_{PB} \dots m_{NB}$  – функции принадлежности соответствующих термов. Однако быстродействие фазы-контроллеров от этого существенно не увеличивается

Известно, что чем больше термов содержит база правил, тем медленнее работает контроллер. И все же главная причина отмеченной медлительности фази-контроллеров состоит не в количестве используемых термов, а в неэффективной организации алгоритмов. Анализ алгоритмов фази-управления, их основных составляющих фашификации, процедуры вывода и дефашификации показал, что большая часть машинного времени тратится на расчет нулей. Так в алгоритме Мамдани [1], где количество термов было семь, расчет нулей занимает более 90%. На рис.3а приведено пространство управления фази-контроллера с пятью термами. Процедура вывода управляющего воздействия осуществляется с помощью метода весов (5). Обычно в процессе работы существующих фази-алгоритмов рассчитываются выходные воздействия от всей базы правил. Однако реальный вклад при расчете величины управляющего воздействия вносит лишь ее небольшая часть. Большинство же правил в конкретной ситуации генерирует нули. Так из 25 правил фази ПИ регулятора, состоящего из двух входов, каждый из которых представлен пятью термами, в произвольный момент времени работают, максимум четыре правила, рис.1. Эффективность фази алгоритма в данном случае равна 4/25. На рис.3б показано пространство управления, когда отклонение и производная находятся в зоне действия термов РВ. Как из него видно, в работе находится лишь небольшая часть пространства, плоская часть пространства соответствует нулям.

Для улучшения эффективности фази алгоритмов в работе [8] предложено использование так называемого дешифратора функций принадлежности (MF-декодер), построенного на четкой логике. С его помощью одновременно активизируются только две функции принадлежности на каждое условие некоторого правила. Например, на рис. 2 видно, что каждый из входных сигналов в некоторый момент времени может находиться лишь в одной из зон (в данном случае их четыре). В зависимости от величины входных сигналов модуль подключает только те правила, которые соответствуют конкретной ситуации. Таким образом, независимо от значений входов в работе всегда находятся не более четырех правил. Неудобством использования MF- декодеров для повышения быстродействия алгоритмов является необходимость разработки программ - анализаторов, которые при большом числе входов и могут быть достаточно сложными. Однако в стандартных случаях, когда число условий в правилах не превышает двух, использование MF-декодеров может существенно повысить быстродействие фази - алгоритмов. Всегда можно выделить некоторые зоны, в которых должны активизироваться соответствующие правила. В нашем случае их по четыре для каждого входа рис.2.

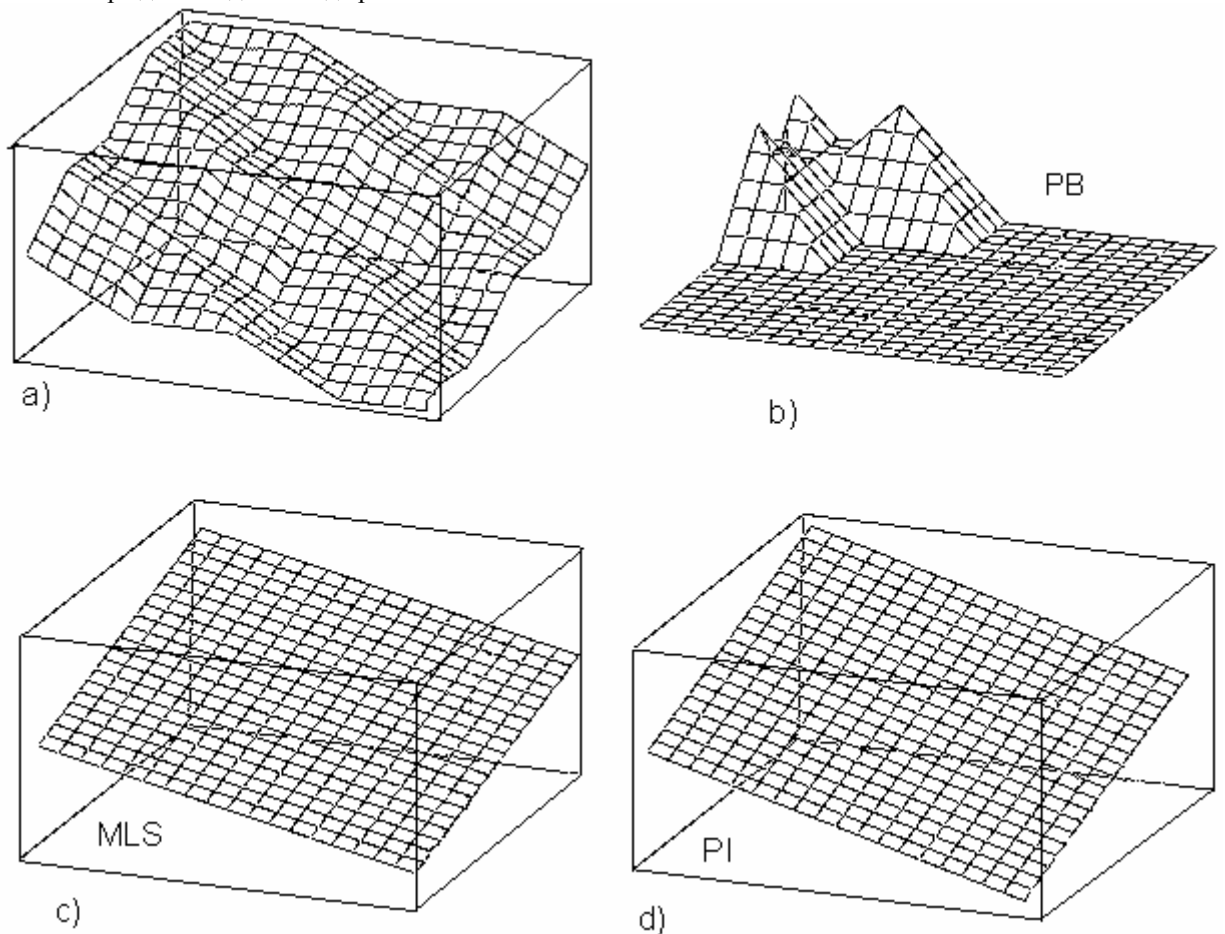


Рис.3

Используя MF- декодер, можно легко составить алгоритм, когда активизируется не более двух правил одного входа контроллера. При равномерном распределении термов, используя свойство

симметричности зон активации правил, в ряде случаев можно реализовать очень простые фазы алгоритмы. Например, на рис.5 приведена принципиальная схема реализации нечеткого П алгоритма, использующего лишь одну четверть входного диапазона и часть выходного диапазона.

Другой путь повышения быстродействия фазы алгоритмов связан с идеей метод Takagi-Sugeno. В нем нечеткие выходные термы заменяются четкими значениями. Такая замена в явном виде исключает импликацию и инференц процедуры. Идя далее по пути упрощения фазы-алгоритмов, заменим входные лингвистические значения их четкими значениями (синглтонами). Теперь, для определения управляющего воздействие, достаточно связать четкие входные и четкие выходные значения базовых термов функциональной зависимостью. В случае одномерной задачи, это наиболее просто достигается построением полинома, что реализуется с помощью метода наименьших квадратов:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (6)$$

где  $X^T X$  –информационная матрица, состоящая из единичного вектора и вектора, базовых значение входных термов,  $Y$  – базовые значения выходных термов,  $B$  – коэффициенты полинома.

Линейная часть зависимости между входными и выходными термами (рис.3b) описывается следующим полиномом:

$$Y = b_0 + b_1 X \quad (7)$$

Нелинейная связь между термами, в зависимости от их числа и расположения, также может быть аппроксимирована несколькими линейными полиномами, связывающими соседние термы или одним полиномом более высокого порядка рис.4 а,с.

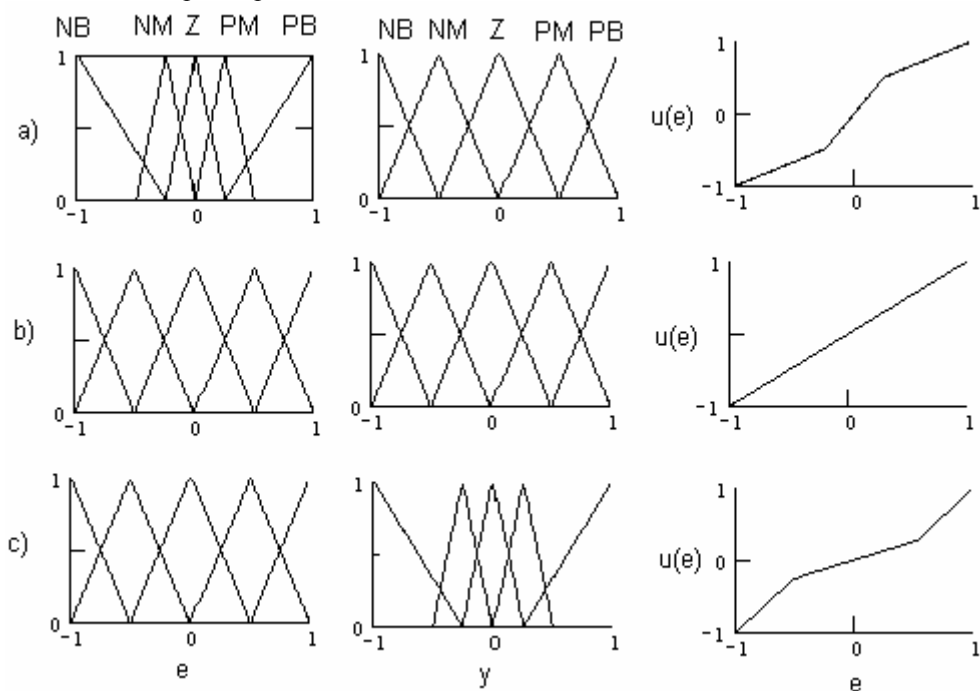


Рис.4

В многомерной линейной задаче, например, при синтезе нечеткого ПИД контроллера, зависимость между термами можно аппроксимировать с помощью методов теории экспериментов [9]. В этом случае для построения уравнения управляющего пространства достаточно ограничиться  $N = 2^k$  правилами, где  $k$  – базовые значения входных термов. Для ПИД контроллера пространство управления может быть представлено внутри гиперкуба. Введем следующие обозначения:  $X_1 = e$ ;  $X_2 = de$ ;  $X_3 = d^2e$ .

Уравнение, описывающее управляющее пространство ищется в следующем виде:

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_1 X_3 + b_6 X_2 X_3 + b_7 X_1 X_2 X_3, \quad (8)$$

где коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, \dots$  определяются по формуле:

$$b_i = N^{-l} \sum_0^N Y_i \cdot X_i \quad (9)$$

Пример построения аппроксимации базы правил нечеткого ПИ-контроллера. Представим базу правил ПИ-контроллера табл.1 базовыми значениями функций принадлежности. В результате получим

табл.2. С ее помощью составим матрицу планирования ПФЭ и рассчитаем коэффициенты модели табл.3. В результате получим аппроксимирующее выражение пространства управления быстрого нечеткого контроллера (FFC), который по скорости работы не уступает своему четкому аналогу:

$$Y = 0.5e + 0.5de \quad (10)$$

На рис.3д изображено пространство управления четкого ПИ-контроллера, на рис.3с - аналогичное пространство нечеткого ПИ-контроллера, полученное путем непосредственной аппроксимации базовых значений входных и выходных терм контроллера. На рис.6а приведены переходные процессы четкого ПИ-контроллера и нечеткого контроллера, управляющее воздействие которого рассчитано методом весов. На двух других рисунках сравниваются переходные процессы четкого контроллера и контроллера реализованного с помощью прямой аппроксимации термов (метод СКО). Как видно на рис.6с, переходные процессы, полученные в системе с быстрым фазы - контроллером, после его подстройки весьма близки к переходным процессам системы с четким ПИ-контроллером.

Таблица 1

e/de	PB	PM	Z	NM	NB
NB	Z	NM	NM	NB	NB
NM	PM	Z	NM	NM	NB
Z	PM	PM	Z	NM	NM
PM	PB	PM	PM	Z	NM
PB	PB	PB	PM	PM	Z

Таблица 2

e/de	1	0.5	0	-0.5	-1
-1	0	-0.5	-0.5	-1	-1
-0.5	0.5	0	-0.5	-0.5	-1
0	0.5	0.5	0	-0.5	-0.5
0.5	1	0.5	0.5	0	-0.5
1	1	1	0.5	0.5	0

Таблица 3

№	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y
1	+	+	+	+	1
2	+	-	+	-	0
3	+	+	-	-	0
4	+	-	-	+	-1
b <sub>i</sub>	0	0.5	0.5	0	

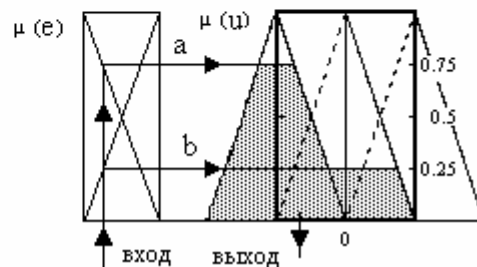


Рис. 5

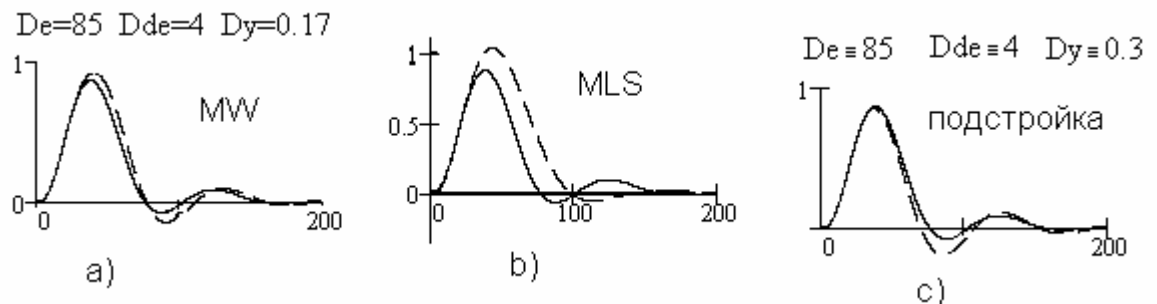


Рис.6

### Вместо заключения

Приведенная модель быстрого фазы контроллера не содержит типовых операций, свойственных традиционным фазы контроллерам (фазификацию, инференц-процедуру и дефазификацию). Однако это не дискредитирует идею использования фазы контроллеров. Наоборот, предложенный метод позволяет установить более прочный мост между четкими и нечеткими теориями, методами и т.д.

Обладая таким же быстродействием, как и четкий ПИ контроллер, быстрый фазы контроллера по-прежнему может реализовывать нечеткие утверждения типа:

“If e is PB and if de is PM then u is NM”,

что недоступно большинству традиционным четким регуляторам.

С чисто практической точки зрения неважно, какие из контроллеров лучше четкие, нечеткие или даже их гибридные варианты. Современная концепция требует совместного использования различных контроллеров, включая фазы, логические, генетические и др. в зависимости от целей управления и внешней информации поступающей на объект. Она реализуется с помощью структурной схемы системы управления приведенной на рис.7. На ней контроллеры C1, C2 ..., Cn представляют собой автономные устройства,

каждое из которых получает доступ к исполнительному механизму при наступлении соответствующих условий. Идентификацию этих условий осуществляет нечеткий логический контроллер FLC и подключает тот или иной одно целевой контроллер к управлению объектом. Нечеткий контроллер, как более универсальный, является предпочтительней. В первую очередь его появление обязано кризису четкой автоматике.

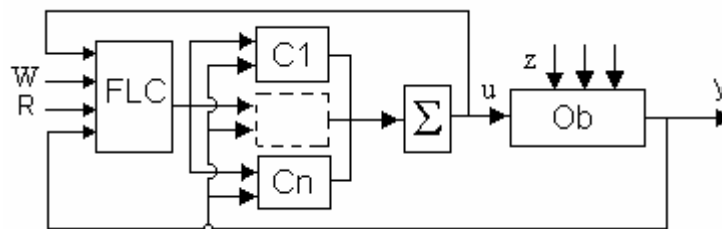


Рис.7

Предлагаемая идея построения схем управления объектами является очередной цепочкой в направлении, развиваемом кафедрой АСУ ТП МЭИ [12,15]. Она также хорошо согласуется с принципом разделения труда, существующим между людьми. Любая составляющая системы управления должна выполнять свою индивидуализированную часть работы лучше других. Реализация универсальной системы многоцелевого назначения приводит к неоптимальному ведению технологических процессов на всех режимах. Выдающийся российский авиаконструктор А.Н.Туполев на предложение построить многофункциональный самолет ответил, что такое творение уже создано, им является утка. Она умеет летать, бегать, плавать и нырять, но все это она делает плохо. Современная четкая автоматика сегодня приблизилась к такому состоянию. Разделение задач между «специализированными» контроллерами позволит каждому из них выполнять свои функции оптимально.

### Литература

1. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant. Proc. IEEE 121, No.12, 1585-1588,1974.
2. Kaoru Hirota, Industrial Applications of Fuzzy Technology. Tokyo, 1992, 310.
3. Butkiewicz B. S. Properties of a System with hybrid Fuzzy-conventional PID Controller. 5-th International Conference on Soft Computing. MENDEL'99. 1999, 223-227
4. Pivoňka P., Marek Brejl. Use of fuzzy PID controllers in fuzzy control of coal Power Plants. Proc. of Fuzzy 96, Zittau, Germany, 1996, 441- 448.
5. Pivoňka P., Blaha P. Comparative Analysis of Classical and Fuzzy PID Control Algorithms, PROC. 7-th Zittau Fuzzy- Colloquium, Germany 1999, 176-181.
6. Rotach V., On Connection between Traditional and Fuzzy PID Regulators, PROC. 6-th Zittau Fuzzy- Colloquium Germany. 1998, 86-90.
7. Rotach V., Expert method in the theory of automatic control, PROC. 7-th Zittau Fuzzy- Colloquium, Germany 1999, 182-186.
8. Meiritz A., Schildt G.H. Model of an adaptive fuzzy controller with explicit transfer function, Proceeding of Fuzzy 96, Zittau, Germany, 1996, 58-66
9. Усенко В.В., Щедеркина Т.Е. Использование простейших планов теории эксперимента в задачах многомерной аппроксимации, Тр. МЭИ, вып.373, 1978, 57-59.
10. Arakeljan E.K, Panko M.A.Fuzzy Algorithms for optimal control of Thermal processes PROC. 7-th Zittau Fuzzy- Colloquium, Germany 1999, 252-255.
11. Mizumoto M. Realization of PID controls by fuzzy control methods. Fuzzy Sets and Systems, 7, 1995, 171-182.
12. Zadeh L.A., Fuzzy sets, Information and Control 8, 1965, 338-353
13. Mielczarski W. (Editor). Fuzzy Logic Techniques in Power Systems. Physica-Verlag, 1998, 456.
14. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control //IEEE Trans.on SMC – 1985, Vol., N 1. 116-132.
15. Maeda M, Murakami S. Follow up control of an automobile with fuzzy logic. Collected Papers of the 3rd Fuzzy Systems Symposium. Osaka, 1987, 61-66