УДК 681.3.068

Р.М.ПРОСКУРЯКОВ, В.В.СТАЛЬСКИЙ, С.В.СТОРОЖЕНКО
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

АДАПТИВНАЯ ФАЗЗИ-СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

Рассматривается адаптивная фаззи-система автоматического регулирования, предназначенная для стабилизации различных параметров технологических процессов обогатительных фабрик. Система адаптируется к нерегламентированным, неучтенным при базовом расчете изменениям технологических параметров.

The adaptive fuzzy-system of automatic control for stabilization of meanings of various parameters of technological processes at the concentrate factories is considered. The system adapts to unforeseen changes of technological parameters.

В последнее время в промышленных системах автоматического регулирования (САР) кроме обычных (классических) регуляторов широко применяются фаззи-регуляторы, которые имеют ряд важных преимуществ по сравнению с обычными [2, 5].

Нечеткие, или фаззи-регуляторы, нелинейны по определению [1, 4]. Нелинейными являются, фактически, и все технологические процессы, в том числе и на обогатительных фабриках (ОФ). Поэтому при управлении такими процессами с применением нечетких регуляторов принципиально всегда могут быть достигнуты лучшие результаты, чем при использовании линейных классических регуляторов.

Процессы обогащения на ОФ такие, как измельчение, флотация, обезвоживание и др. представляют собой сложные глубоко нелинейные объекты управления и их автоматизация – предмет дорогостоящих научных работ, причем даже по окончании исследований требуются еще значительные затраты времени и средств по наладке и опытной эксплуатации автоматизируемых процессов. Отсюда, использование новых и требующих меньших затрат на исследования и внедрение устройств автоматики, построенных на основе нечеткой логики, является перспективным.

Для многих технологических процессов, в том числе для объектов управления на ОФ, рационально использовать адаптивные системы. Это связано, прежде всего, с часто встречающимися нерегламентированными изменениями технологических параметров процессов на ОФ, которые с точки зрения автоматики являются непредусмотренными в базовом (расчетном) режиме работы САР возмущениями. В свою очередь нарушения регламента в технологии ОФ могут быть следствием, например, изменения параметров сырья, изношенности оборудования и т. д. В этих случаях использование на ОФ адаптивных САР вместо обычных чаще всего окажется рентабельным.

На рис.1 показана блок-схема адаптивной фаззи-САР стабилизации переменной на выходе системы. Адаптация происходит при

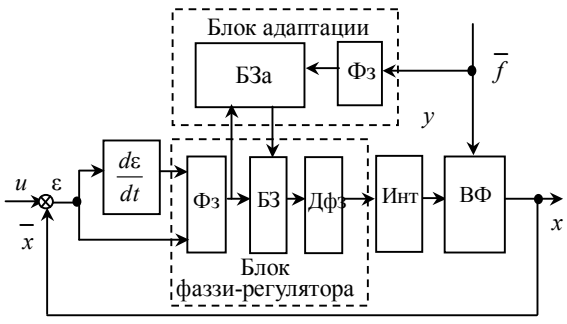


Рис.1. Блок-схема адаптивной фаззи-САР стабилизации влажности кека на выходе вакуум-фильтра

продолжительных и значительных изменениях возмущений по сравнению со значениями, учитываемыми при базовом расчете САР. Основной блок адаптивного фаззи-регулятора состоит из трех частей: фаззификатора входных сигналов, т.е. преобразователя «четких» значений переменных в термы терм-множеств НЛ (Фз); базы знаний, содержащей в форме логических правил знания экспертов (БЗ); дефаззификатора, преобразующего полученные нечеткие результаты в четкие величины выходной переменной (Дфз).

На вход Фз подается сигнал ошибки регулирования $\varepsilon = u\text{-}x$ и сигнал от дифференциатора d / dt (переменные $\varepsilon(t)$, $x(t)$ – функции времени, но здесь и далее аргумент t опущен). Дифференциатор является обязательным устройством на входе фаззи-регулятора, так как производная по времени входной переменной, как правило, присутствует в так называемых декларативных логических правилах БЗ. Интегратор добавляется для создания фаззи-ПИД алгоритма в САР в цепи входного сигнала и может быть установлен в цепи выходного сигнала после Дфз. Тогда на его вход поступает четкое значение с выхода фаззи-регулятора (рис.1), который в этом случае будет отрабатывать фаззи-ПД-алгоритм регулирования [2].

В фаззификаторе Фз входные переменные преобразуются в терм-множества, которые математически представляются, как правило, в виде функций принадлежности (ФП). Например, переменная ошибки регулирования ε – элемент терм-множества A_ε отображается ФП μ_ε, переменная $\varepsilon' = d\varepsilon / dt$ – соответственно – $\mu_{\varepsilon'}$ и т.д. Фаззификатор блока адаптации преобразует сигналы от сенсоров возмущений – элементов вектора $\overline{f}$. Например, f_1 – нагрузка, основной материальный поток (на ОФ), f_2 – важный признак, характеризующий нагрузку и т.д. Все ФП геометрически представляются в линеаризованной трапецеидальной или треугольной форме, а также в форме синглетонов [4, 5]. Отметим, что использование для ФП треугольников различных форм для разных значений шкалы переменной одной ФП делает преобразования сигналов нелинейными уже при формировании входных переменных.

База знаний БЗ состоит из логических правил ЕСЛИ…,ТО, разработанных экспертами. Экспертные правила представлены в вербальной (словесной) форме в виде термов терм-множеств. На практике терм-множества состоят не более чем из семи-девяти термов. Для представления ФП терм-множеств САР стабилизации обычно используется шкала переменной с нулем посередине [2, 5]. Стандартный набор термов в этом случае имеет три положительных и три отрицательных терма (слева-направо): отрицательные – «большой» (ОБ), «средний» (ОС), «малый» (ОМ), затем «около нуля» (Н); положительные – «малый» (ПМ), «средний» (ПС), «большой» (ПБ).

В адаптивной базе знаний БЗа кроме ФП с индексами ε, ε' участвуют также ФП с индексами переменных элементов вектора возмущений $\mu_{f1}, \mu_{f2} \ldots$ Термы терм-множеств, поступающие от Фз, записываются в часть ЕСЛИ логических правил ЕСЛИ…,ТО. В части ТО фигурирует только один терм ФП μ_y – выходной величины, т.е. регулирующего воздействия. Количество термов в ФП μ_y чаще всего совпадает с количеством термов ФП входных сигналов, но в зависимости от типа регулирующего органа может быть принято и другое количество термов. В БЗа в части ТО декларативные логические правила также содержат термы множества с ФП μ_y.

В БЗ и БЗа имеются так называемые процедурные логические правила [5]. Эти правила создаются экспертами, участвующими в программировании компьютеров (контроллеров), используемых в качестве аппаратных средств нечеткого регулятора. Процедурные правила работают при изменениях режима действия САР. Например, с учетом времени действия возмущения $f_{1,20}$, где индекс 20 означает – данное воздействие не прекращается уже 20 минут, правило в БЗа: ЕСЛИ ε = ПС И $f_{1,20}$ = ПБ ТО m = вкл (здесь m – переменная четкого множества М, ФП которого $\mu_m = 1$ (вкл) или $\mu_m = 0$ (откл)). Процедурные правила могут

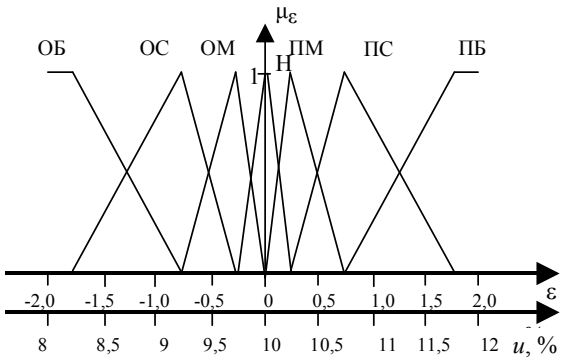


Рис.2. Функции принадлежности ошибки регулирования

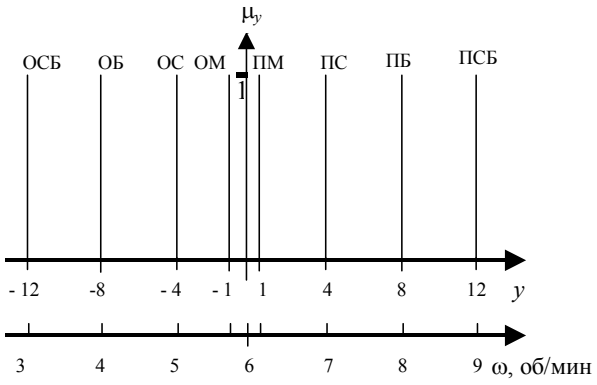


Рис.3. Функции принадлежности регулирующего воздействия

иметь в части ЕСЛИ такие условия, на основе которых в части ТО может подаваться команда замены одних правил, например из БЗ, другими правилами, например из БЗа.

Последняя часть фаззи-регулятора – дефаззификатор, получение четких значений регулирующей величины по результатам, полученным из логических правил в виде ФП БЗ. В настоящее время известно несколько методов [2, 4] дефаззификации. Для автоматического регулирования чаще используется метод центра тяжести [4]. Использование для выходной величины БЗ ФП вида синглетоны позволяет упростить вычисление по этому методу четких значений регулирующего воздействия практически без снижения точности преобразования.

БЗа включается в работу при значительных изменениях возмущений. Для этого в БЗа должна контролироваться длительность действий нерегламентированных возмущений и определен критический промежуток времени для каждого из них. Одновременно необходимость включения БЗа проверяется по значению сигнала ε.

Рассмотрим в качестве примера несколько фрагментов синтеза адаптивной фаззи-САР стабилизации влажности кека на выходе барабанного вакуум-фильтра (ВФ) с внутренней фильтрующей поверхностью [1]. В ВФ выполняется фильтрование суспензии концентрата после сгущения.

ВФ должен выдавать стабильную влажность кека, например 10 % относительной влажности (u = 10 %). Регулирующее воздействие САР (рис.1) – скорость вращения барабана (y = ω об/мин), вектор возмущений $\overline{f}$ состоит из нескольких компонентов: f_1 – расход фильтруемой суспензии, нагрузка ВФ; f_2 – плотность суспензии на входе; f_3 – сопротивление фильтрующей перегородки; f_4, f_5 и прочие компоненты вектора $\overline{f}$ – менее существенные возмущения [1].

При синтезе САР стабилизации влажности кека x удобно использовать шкалу ошибки ε. График ФП μ_ε показан на рис.2. Термы ФП на рис.2 линеаризованы в виде треугольников. Благодаря отличию треугольников друг от друга ФП μ_ε нелинейна. Принятая конфигурация ФП выбрана специально таким образом, чтобы статическая характеристика фаззи-регулятора обеспечивала в области стабилизируемого значения переменной увеличение коэффициента усиления регулятора по сравнению с остальными частями характеристики. Такой же по форме представляется и ФП $\mu_{\varepsilon'}$.

Терм-множество ФП μ_y регулирующего воздействия принято в форме синглетонов. Сама ФП μ_y разделена на 9 термов (рис.3). За ноль (Н около нуля) принимается регламентная скорость вращения барабана ВФ, равная 6 об/мин, к наименованиям термов ФП μ_ε на рис.3 добавлены еще два терма: положительная сверхбольшая скорость (ПСБ) и отрицательная сверхбольшая (ОСБ), что соответствует самому медленному вращению барабана ВФ. Конфигурация терма ФП μ_ε позволяет увеличить коэффи-

циент усиления в области, близкой к заданному значению регулируемой величины. Коэффициент усиления фаззи-регулятора можно вычислить по аналогии с классическим регулятором [4].

В статическом режиме при определенной аппроксимации расчет коэффициента усиления фаззи-регулятора рассматриваемой фаззи-САР (без учета режима адаптации, см. рис.1) $K_{рф1} = y_{Ki} / \varepsilon_{Ki}$, где $i = 1,2\ldots7$, проводится по максимальным значениям термов ФП μ_ε и μ_y. В расчете для терма (Н около нуля) $K_{рф4}$ принимает граничное значение, т.е. $K_{рф4} = K_{рф3} = K_{рф5}$ (табл.1).

Таблица 1

Расчет коэффициента усиления фаззи-регулятора

Обозначения	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ε	-1,75	-0,75	-0,1	–	0,1	0,75	1,75
y	-8	-4	-1	–	1	4	8
$K_{рф}$	4,5	5,3	10	10	10	5,3	4,5
i	1	2	3	4	5	6	7

Использование различных конфигураций термов ФП позволяет варьировать значения коэффициента усиления фаззи-регулятора при расчете фаззи-системы [3]. Для создания БЗ и БЗа, содержащих описание процесса фильтрования как объекта регулирования и алгоритма регулирования, эксперты, используя формулу ЕСЛИ…,ТО, записывают ряд логических правил. В нашем примере для БЗ в части ЕСЛИ всех формул присутствуют только два терма ФП μ_ε и $\mu_{\varepsilon'}$, весь набор формул ЕСЛИ…,ТО для БЗ можно наглядно представить в виде матрицы (табл.2). В строках представлены значения термов ФП μ_ε, а в столбцах $\mu_{\varepsilon'}$. На пересечении строк и столбцов записаны термы результирующего терм-множества части ТО, т.е. ФП μ_ω. Верхний ряд в строках – процесс без адаптации, нижние строки (курсив) – с адаптацией, т. е. при работе БЗа.

Без адаптации, при обычном регламентном режиме ВФ, правило из основной БЗ, например, для первой (верхней) строки и второго (слева) столбца, имеет вид:

ЕСЛИ ε = ОБ И ε′ = ОС,
ТО *y* = ПБ.

При работе ВФ в нормальном режиме в соответствии с регламентом ОФ адаптивная база знаний может продолжительное время не участвовать в работе фаззи-САР. Однако при нарушении регламента как результат решения логического процедурного правила (часть ТО) блок адаптации включается в работу. Например, при значении терма ФП μ_ε – ОС И ФП $\mu_{\varepsilon'}$ – ПБ, что должно соответствовать ОМ для ФП μ_ε и, следовательно, снизить ошибку ε до значения ОМ, фактически окажется, что из-за инерции системы терм ФП μ_ε остается на значении ОС (табл.2) – включается БЗа.

При работе адаптивной БЗ в части ЕСЛИ фаззи-логические правила уже формируют три, четыре (или больше) терма разных ФП. Например, правило

ЕСЛИ ε = ОБ И ε′ = ОС И f_2 = ПБ,
ТО *y* = ПСБ.

Здесь в части ЕСЛИ уже есть три условия и показать ряд правил в виде матрицы не представляется возможным. Для наглядности действия БЗа, в частном случае реализации этого правила, в табл.2 внесены условно его термы части ТО, ФП μ_y. Они показаны в нижних строках табл.2 курсивом. Так, если возмущение f_2 значительно возросло (f_2 = ПБ) и фильтр выдает слишком низкую влажность кека [1], из табл.2 видим, что адаптация в этом случае заключается в повышении скорости *y* (ω). При таком возмущении стабилизация ε = Н достигается не после *y* = ПМ, но уже после *y* = ПС.

Очевидно, что при значительном снижении f_2 (например, f_2 = ОБ) реакция БЗа будет противоположной и для этого случая можно было бы заполнить симметричную вторую (разделенную диагональю Н) половину табл.2. Во время работы блока адаптации в управлении участвуют все или часть правил БЗа и все или часть правил блока БЗ. В примере рассмотрен только простейший частный случай. Реальным является совмещение различных нерегламентированных возмущений. Все эти варианты должны быть предусмотрены адаптивной базой знаний [3].

Таблица 2

Алгоритм работы фаззи-регулятора

$\mu_{\varepsilon'}$ / μ_{ε}	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ОБ	ПБ *псб*	ПБ *псб*	ПБ *псб*	ПБ *пб*	ПС *пб*	ПМ *пс*	Н
ОС	ПБ *псб*	ПБ *псб*	ПБ *псб*	ПС *пб*	ПМ *пс*	Н	ОМ
ОМ	ПБ *псб*	ПБ *псб*	ПС *пб*	ПМ *пс*	Н	ОМ	ОС
Н	ПБ *псб*	ПС *пб*	ПМ *пс*	Н	ОМ	ОС	ОБ
ПМ	ПС *пб*	ПМ *пс*	Н	ОМ	ОС	ОБ	ОБ
ПС	ПМ *пс*	Н	ОМ	ОС	ОБ	ОБ	ОБ
ПБ	Н	ОМ	ОС	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дейч В.Г.* Оптимальное управление процессом фильтрования суспензий / В.Г.Дейч, В.В.Стальский, С.В.Стороженко // Изв. вузов. Горный журнал. 1983. № 2. С.94-98.

2. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy-TECH. СПб: БХВ – Петербург, 2003. 721 с.

3. *Проскуряков Р.М.* Проектирование нечетких систем автоматического регулирования горных машин / Р.М.Проскуряков, В.В.Стальский, С.В.Стороженко // Изв. вузов. Горный журнал. 2000. № 6. С.81-86.

4. *Iserman R.* Zur Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik // Automatisierungstechnische Praxis. 38. 1996. № 11. S.24-26.

5. *Lutz H.* Taschenbuch der Regelungstechnik / H.Lutz, W.Wendt. Frankfurt am Main: Verlag Haar, 1998. 899 s.