

УДК 681.5.01:658.512

**Володин Александр Андреевич, Лубенцова Елена Валерьевна,
Лубенцов Валерий Федорович**

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ПОТОКОВ СУБСТРАТА И ПРОДУКТА ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ БИОСИСТЕМЫ

В статье приведены результаты исследования динамических характеристик непрерывной биотехнологической системы с помощью разработанных нейро-нечетких регуляторов потоков субстрата и продукта при вариации следующих характеристик регуляторов: числа и типа функций принадлежности, набора правил нечеткого регулятора. Анализ полученных результатов показал, что при использовании нечетких регуляторов перерегулирование в контурах регулирования потоков субстрата и продукта меньше в 1,5–2 раза соответственно, чем при использовании неадаптивных регуляторов.

Ключевые слова: нейро-нечеткие регуляторы, субстрат, гауссовские функции принадлежности.

**Volodin Aleksandr Andreevich, Lubentsova Elena Valeryevna, Lubentsov Valery Fedorovich
CONSTRUCTION AND RESEARCH OF THE NEURO AND INDISTINCT REGULATORS
OF STREAMS OF THE SUBSTRATUM AND PRODUCT FOR OPERATED
CONTINUOUS BIOSYSTEM**

Results of research of dynamic characteristics of continuous biotechnological system by means of the developed neuroindistinct regulators of streams of a substratum and a product are given at a variation of the following characteristics of regulators: number and type of membership function, set of rules of the fuzzy controller. The analysis of the received results showed that when using fuzzy controllers reregulation in contours of regulation of streams of a substratum and a product 1,5-2 times smaller respectively, than when using not adaptive regulators.

Key words: neurofuzzy controllers, substratum, gaussian functions of accessory.

В последнее десятилетие получил распространение новый принцип построения автоматических регуляторов, использующий правила нечеткой логики. Этот принцип соединяет в себе преимущества простейших релейных (двух-, трехпозиционных) регуляторов и точность цифрового управления. Использование простых и недорогих микроконтроллеров позволяет вести многопозиционное (от нескольких единиц до десятка позиций) управление и в то же время не требует громоздких вычислений, необходимых при непрерывном управлении. С учетом этого в данной работе было использовано управление биосистемой с использованием нечеткой логики и нейросетевой технологии.

В качестве объекта управления рассмотрен процесс биосинтеза в аппарате непрерывного действия, математическая модель которого представлена системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mu_m \frac{s}{s+K} x - D_x(x, s, h)x; \\ \frac{ds}{dt} = D_s(x, s, h)s_0 - \frac{1}{Y} \mu_m \frac{s}{s+K} x - D_x(x, s, h)s; \\ \frac{dh}{dt} = -D_x(x, s, h) + D_s(x, s, h), \end{cases}$$

где x – концентрация биомассы; μ_m – максимальная скорость размножения микроорганизмов; s – концентрация лимитирующего субстрата; K – константа Моно-Михаэлиса или константа полунасыщения, равная концентрации субстрата, при которой скорость их размножения $\mu(t) = dx/dt$ равна половине максимальной; Y – экономический коэффициент по биомассе к субстрату, равный отношению полученной биомассы к израсходованной массе субстрата; $D_s(x, s, h)$, $D_x(x, s, h)$ – количество поступающего субстрата и количество сливаемого продукта.

При исследованиях приняты следующие значения констант: $\mu_m = 0.34$; $s_0 = 40$; $K = 9$; $Y = 0.8$; $h(0) = 0.5$; $x(0) = 20$; $s(0) = 40$.

Отметим, что, если регуляторы потоков субстрата и продукта реализовать на основе сигмоидных функций $D_x(x, s, h)$ и $D_s(x, s, h)$ вида

$$D_s(x, s, h) = K_2 \cdot \text{sigm}(h, -k_1, 1) \text{sigm}(s, -k_3, s_\infty);$$

$$D_x(x, s, h) = K_1 \cdot \text{sigm}(h, k_2, 1),$$

где K_1, K_2, k_1, k_2, k_3 – настроечные коэффициенты (константы), то при известных значениях параметров и коэффициентов модели биосистемы можно компенсировать возмущения по удельной скорости роста микроорганизмов и тем самым стабилизировать состояние биосистемы.

Однако проследить за всеми изменениями биосистемы и учесть все внешние и внутренние факторы, компенсировать контролируемые и неконтролируемые возмущения, влияющие на процесс, с помощью алгоритма функционирования данных нелинейных регуляторов потоков невозможно. Кроме того заметим, что с помощью сигмоидных функций нельзя реализовать итерационный подбор нечеткой базы правил на основе нейро-нечеткой системы, поскольку при обучении для достижения сходимости при итерациях этот инструмент может использовать только функции с максимумом (треугольную, гауссовскую и другие).

Вначале отметим, что используемый в различного рода системах управления механизм нечетких выводов в своей основе имеет базу знаний, формируемую экспертами, в виде совокупности нечетких предикатных правил [1]. Несмотря на то, что правила имеют субъективный характер, они позволяют учитывать неточно определенные данные объекта управления. Но при этом не исключается вероятность появления погрешности вывода решений больше допустимой. Т. е. методика позволяет учитывать априорную неопределенность исходных данных и применима для решения трудноформализуемых задач управления, но для исключения больших погрешностей необходимо проведение исследований с различными характеристиками системы нечеткого вывода, например с различными функциями принадлежности. Сформированная по каждому правилу функция принадлежности определяет выбор того или иного режима.

В качестве алгоритма вывода решения могут применяться известные алгоритмы вывода: Мамдани, Сугено, Цукамото, Ларсена [1]. Данные алгоритмы по-разному реализуют нечеткий логический вывод, но существенных отличий не имеют [2]. Однако правильно выбранный алгоритм вывода может повысить точность получаемого управляющего сигнала. Сравнительный анализ алгоритмов показал [3], что при прочих равных условиях погрешность аппроксимации функции с применением алгоритма Сугэно несколько меньше, чем с применением алгоритма Мамдани. Причем алгоритм Сугэно с вычислительной точки зрения реализуется значительно проще, чем алгоритм Мамдани, а время счета для него меньше, чем для алгоритма Мамдани в 50–100 раз [3]. Поэтому для построения нечеткого регулятора потока субстрата воспользуемся алгоритмом Сугэно. В пакете Matlab система вывода Сугено представлена ANFIS-редактором [4]. ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) – это адаптивная сеть нечеткого вывода, являющаяся одним из первых вариантов гибридных нейро-нечетких сетей – нейронной сети прямого распространения сигнала особого типа [5, 6].

Рассмотрим применение методики ANFIS для синтеза (настройки) нечеткого регулятора потока субстрата D_s . Нечеткий регулятор строится в редакторе систем нечеткого вывода FIS Editor. Для этого в FIS-редакторе создается система нечеткого вывода с двумя входами и одним выходом. В нашем случае на один вход нечеткого регулятора подается сигнал, пропорциональный концентрации субстрата s , а на другой вход – сигнал, пропорциональный уровню жидкости h в аппарате. Генерация системы нечеткого вывода осуществлена со следующими параметрами:

- тип функции принадлежности – треугольная;
- количество функций принадлежности равно 5, что соответствует количеству правил, генерируемых системой нечеткого вывода;
- заданное значение итераций (эпох) – 20;
- алгоритм нечеткого вывода – алгоритм Сугено нулевого порядка.

Заметим, что ANFIS-editor сам подбирает функции принадлежности, функции для формирования выходного сигнала (для модели Сугено нулевого порядка – это просто константы, на которые умножается вход, для модели первого порядка – это линейные функции от входов) и формирует нечеткую базу правил. Это, по сути, ничто иное как своеобразный способ интерполяции исходных данных. Набор правил для fuzzy-регулятора с именем anfistrim5 с пятью треугольными функциями принадлежности представлен на рис. 1.

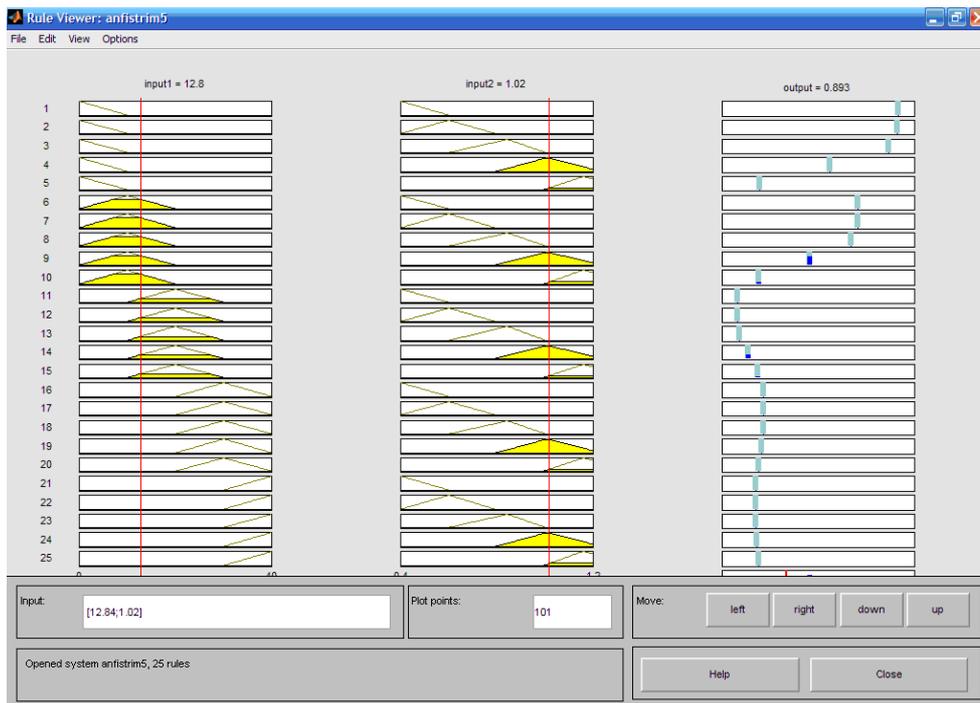


Рис. 1. Результаты работы системы с fuzzy-регулятором anfistrim5

Для сравнения результатов параллельно блоку моделирования fuzzy-регулятора реализован регулятор с сигмоидальной функцией Sigm-Ds (рис. 2).

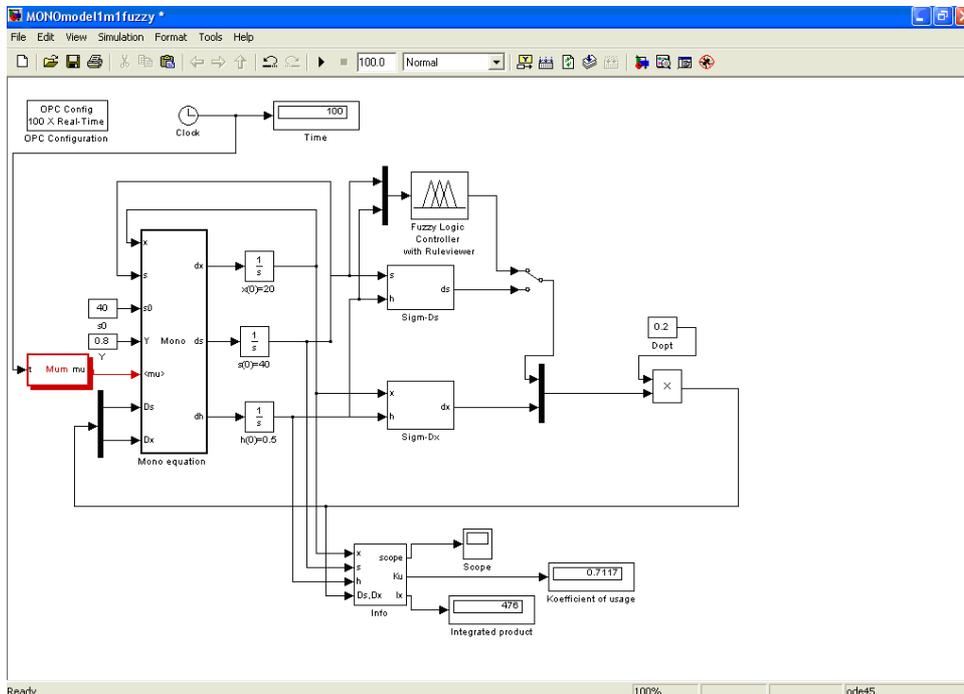


Рис. 2. Схема моделирования fuzzy-регулятора и регулятора с сигмоидальной функцией

Анализ полученных переходных процессов в системе с нечетким регулятором показал, что не выполняются ограничения на поток поступающего субстрата: поток в начале процесса регулирования отрицательный. Это обусловлено тем, что с помощью сигмоидных функций нельзя реализовать итерационный подбор нечеткой базы правил на основе системы ANFIS, поскольку для достижения

сходимости при итерациях этот инструмент может использовать только функции с максимумом (треугольную, гауссовскую и другие).

Для корректировки процесса управления в этом случае воспользуемся следующим результатом, полученным в [4]: зависимость относительной ошибки ε от типа и количества функций принадлежности показывает, что наилучшая интерполяция (в смысле минимальной ошибки ε) в системе с треугольными функциями принадлежности может быть обеспечена за счет увеличения числа функций. Увеличим число треугольных функций принадлежности в модели anfistrim9 до максимально возможного количества, равного 9. Набор правил для fuzzy-регулятора с девятью треугольными функциями принадлежности представлен на рис. 3.

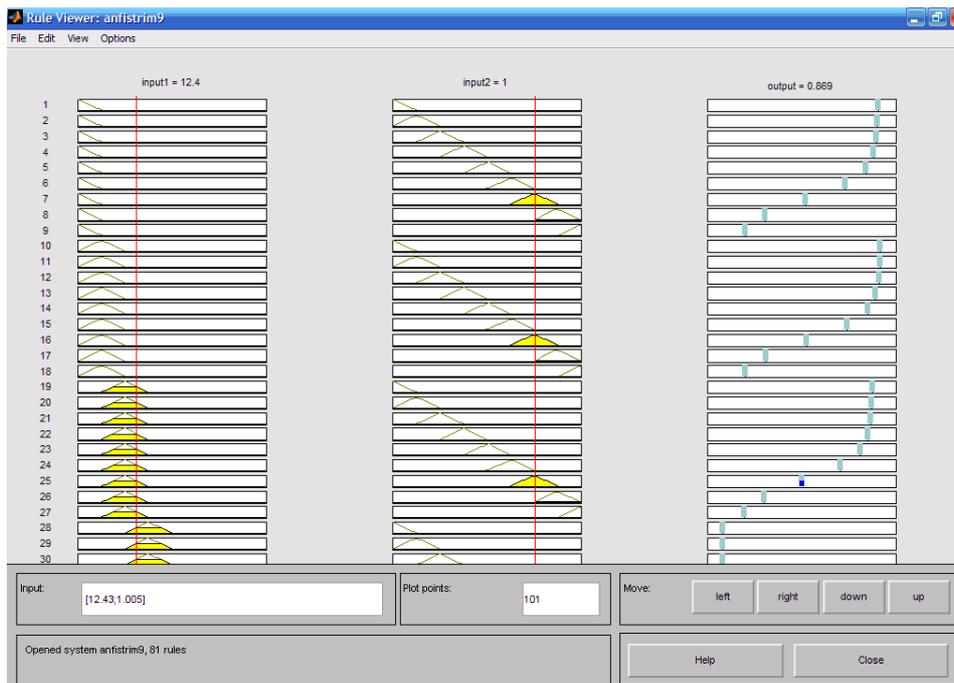


Рис. 3. Результаты работы системы с fuzzy-регулятором anfistrim9

Точность интерполяции при этом возрастает: на 20 итерациях ошибка уменьшается примерно в 3 раза. На рис. 4 показаны поверхности fuzzy-регулятора anfistrim5 (а) anfistrim9 (б) от входов s и h . Как видно, поверхности управления деформированы алгоритмом управления, что характеризует повышение чувствительности выходной переменной регулятора к изменениям в алгоритме регулятора anfistrim9, способствующим удовлетворению требований системы.

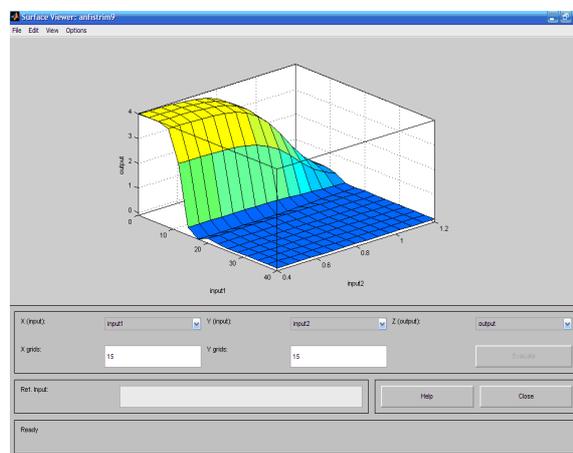
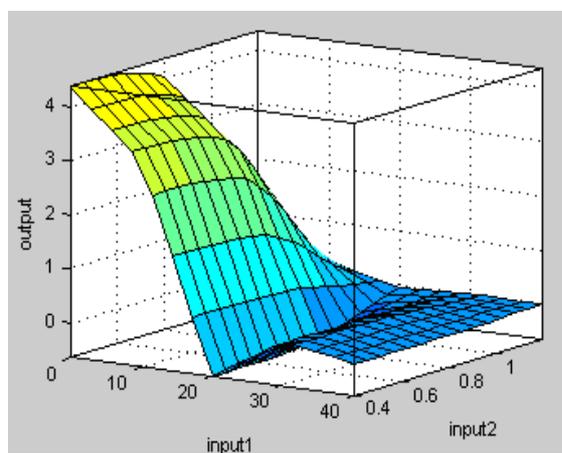


Рис. 4. Поверхность fuzzy-регулятора anfistrim5 (а) и anfistrim9 (б)

Переходные процессы в системе моделирования anfistrim9 с девятью треугольными функциями принадлежности представлены на рис. 5.

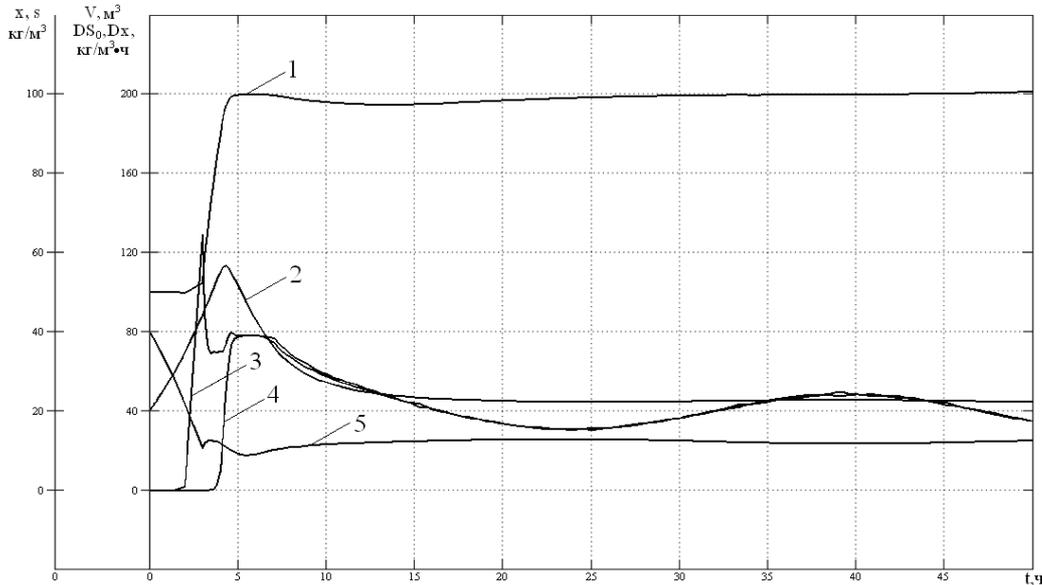


Рис. 5. Переходные процессы в системе с fuzzy-регулятором anfistrim9: 1 – объем жидкости в реакторе (V), 2 – концентрация биомассы $x(x, s)$, 3 – количество поступающего субстрата (DS0), 4 – количество сливающегося субстрата (Dx), 5 – концентрация субстрата $s(x, s)$

Анализ результатов моделирования показал, что ограничение на управление выполнено и изменение управляющего сигнала на поток поступающего субстрата положительно во всем диапазоне регулирования. Однако в начале переходного процесса имеет место значительное увеличение притока поступающего субстрата, что вызывает увеличение потока сливаемого субстрата при практически неизменной концентрации биомассы, а это фактически означает перерасход поступающего в аппарат субстрата. Это, на наш взгляд, является следствием большой ошибки интерполяции при малом числе итераций в начале процесса регулирования.

Из работы [4] следует, что минимальную ошибку при количестве функций принадлежности по каждому входу от 2 до 4 обеспечивает более гладкая по сравнению с треугольной гауссовская функция gaussmf и gauss2mf. Сдвоенная гауссовская функция имеет следующий вид:

$$\text{gauss2mf}(x, [\sigma_1, c_1, \sigma_2, c_2]) = \begin{cases} \frac{(x-c_1)^2}{2\sigma_1} & x \leq c_1; e \\ 1 & c_1 \leq x \leq c_2; \\ \frac{(x-c_2)^2}{2\sigma_2} & x \geq c_2; e \end{cases}$$

где $\sigma_1, \sigma_2, c_1, c_2$ – настроечные параметры функции принадлежности.

Применим в алгоритме разрабатываемого нечеткого регулятора для управления биосистемой модель anfsgauss2.fis, содержащую по три сдвоенных гауссовских функции gauss2mf по каждому входу (9 правил). Результаты моделирования системы показывают, что пиковый выброс субстрата на притоке, имевший место в начале процесса регулирования, устранен, а время счета сокращается в 25 раз.

Рассмотренный fuzzy-регулятор применим при хеостатном режиме культивирования, который характеризуется малым протоком, когда концентрация клеток изменяется незначительно с изменением скорости протока, что облегчает саморегулировку системы и внешнее управление биосистемой. Когда же процесс биосинтеза характеризуется высокими скоростями разбавления, обуславливающими быстрое и резкое изменение концентрации биомассы, то требуется контроль

концентрации биомассы (x) и учет этой информации при управлении. Для учета этой информации зададим в *fis*-редакторе систему Сугено с тремя входами s , h и x и двумя выходами ds и dx . Зададим в окне функций принадлежности входов зависимости и диапазоны параметров fuzzy-регулятора. Диапазоны для входов задаются в реальных пределах изменения входных величин и приведены в таблице.

Таблица

Параметры fuzzy-регулятора по Сугено

Вход	Функция	Диапазон	Смысл: степень принадлежности
s	$sr = \text{sigmf}(s, [-1.5 \ 12])$	[0 40]	по концентрации субстрата к состоянию системы, когда его надо заливать.
h	$hs = \text{sigmf}(h, [-11.5 \ 1])$	[0.4 1.2]	по заполнению к состоянию системы, когда надо заливать субстрат.
	$hx = \text{sigmf}(h, [27 \ 1])$		по заполнению к состоянию системы, когда надо сливать продукт.
x	$xr = \text{sigmf}(x, [1.5 \ 22.4])$	[0 40]	по концентрации продукта к состоянию системы, когда надо сливать продукт.

Для каждой пары вещественных значений входов значение выхода постоянно и равно либо максимальному значению ($\max = 8$), либо минимальному ($\min = 0$). Эти правила по сути сводятся к следующему. Если система в таком состоянии по концентрации субстрата s и заполнению h , что надо доливать субстрат, он доливается, это правило (1). При всех иных состояниях по s и h он не доливается, правила (2, 3 и 4). Аналогично, если система в таком состоянии по концентрации продукта x и заполнению h , что надо продукт сливать, он сливается, это правило (5). При всех иных состояниях по x и h он не сливается, правила (6, 7 и 8).

Результаты работы системы с fuzzy-регулятором *dstdxm.fis* представлены на рис. 6, 7.

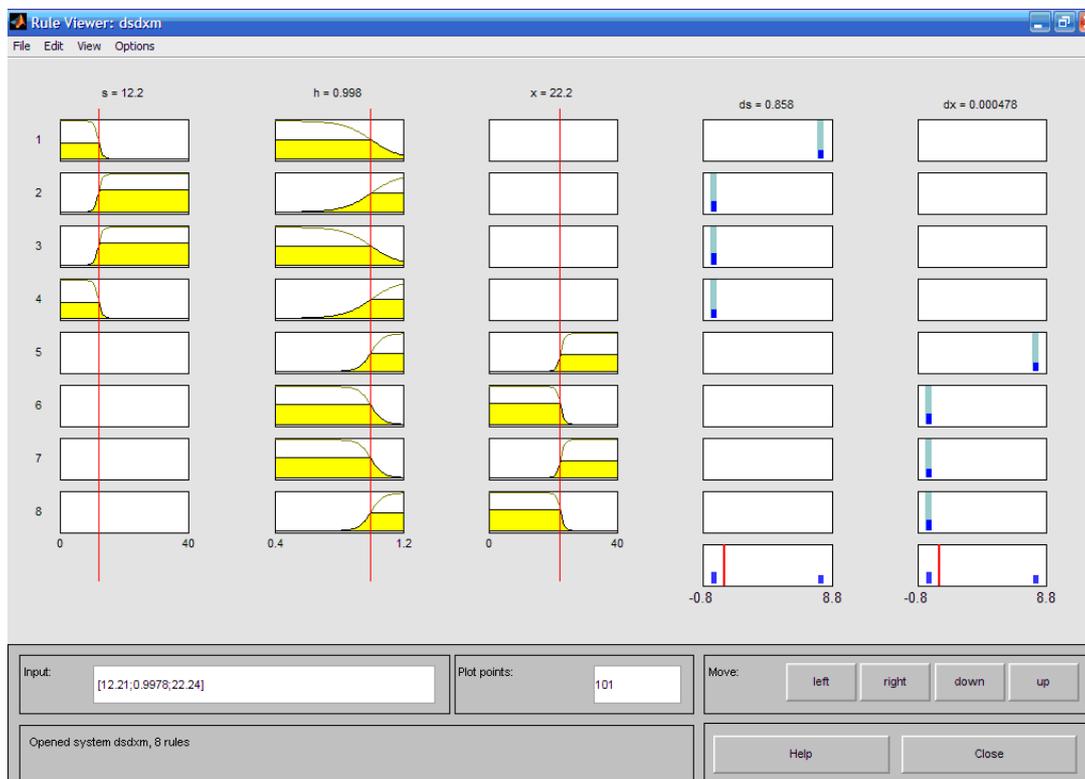


Рис. 6. Результаты работы системы с fuzzy-регулятором *dstdxm.fis*

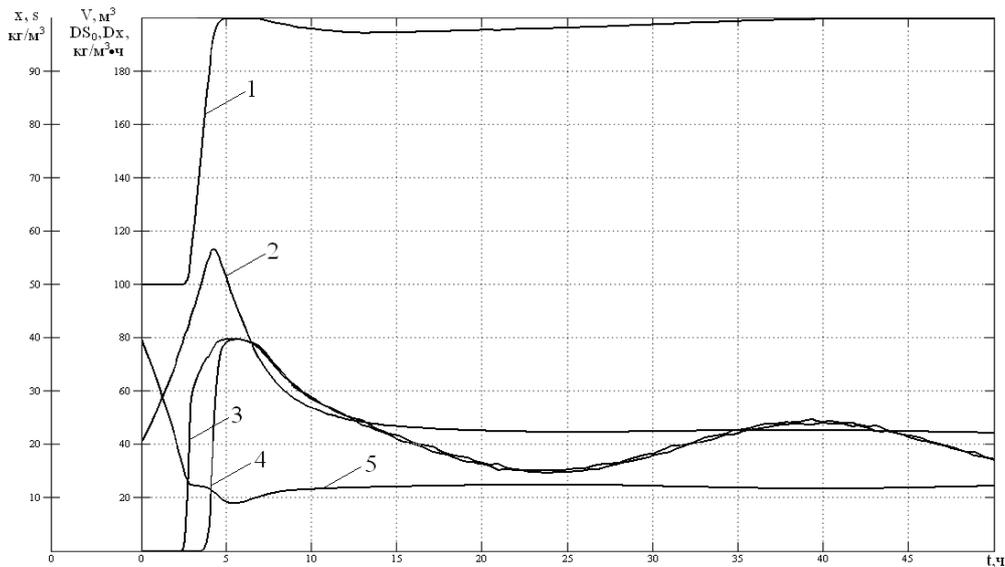


Рис. 7. Регулирование потоков fuzzy-регулятором dsdxm.fis

Сравнение переходных процессов в системах с нейро-нечеткими регуляторами с двумя и тремя входами, позволяет отметить, что fuzzy-регулятор, учитывающий информацию об изменении концентрации биомассы, обеспечивает более точную стабилизацию уровня в аппарате (точность выше на 2,67 %).

Таким образом, результаты решения задачи построения нейро-нечеткого регулятора потока субстрата в биореактор с использованием системы ANFIS и нечеткого вывода Сугено нулевого порядка позволяет отметить следующее:

1. Использование системы ANFIS позволяет производить синтез и настройку нечеткого регулятора на основе анализа динамических характеристик биосистемы и оценки качества управления, не имея полной информации о биологическом объекте управления и не требуя больших затрат времени на обучение.

2. Нечеткий регулятор, синтезированный с помощью треугольных функций принадлежности, имеет сложную базу правил и не устраняет пиковые выбросы на потоке субстрата в начале процесса регулирования, а также затрудняет интерпретацию исходной модели по сравнению с регулятором на основе сигмоидной функции управления.

3. Наиболее эффективным при синтезе нечеткого регулятора потока субстрата является использование гауссовских функций принадлежности при трех правилах разложения по каждому входу.

4. При высоких скоростях разбавления, обуславливающих быстрое и резкое изменение концентрации биомассы, в качестве входной лингвистической переменной нечеткого регулятора целесообразно дополнительно использовать концентрацию биомассы в аппарате. Такой подход позволяет формировать управляющие воздействия в зависимости концентрации лимитирующего субстрата, концентрации биомассы и уровня в реакторе, обобщая информацию о скорости роста микроорганизмов.

Литература

1. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 726 с.
2. Сиянская Е. Д. Разработка композиционной модели управления для совершенствования работы технологического процесса. URL: http://www.confcontact.com/2012_03_15/tn2_sinyavska.php (дата обращения: 12.11.2012).
3. Круглов В. В. Сравнение алгоритмов Мамдани и Сугэно в задаче аппроксимации функции // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2003. № 5. С. 70–82.
4. Скриль Д. Исследование системы передачи мобильной связи с нейронечеткой идентификацией тракта передачи [pinchukfund.ru>storage/students/works/2008/440.doc](http://pinchukfund.ru/storage/students/works/2008/440.doc) (дата обращения: 10.09.2012).
5. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 224 с.
6. Синтез нечеткого регулятора электропривода постоянного тока в среде MatLab. URL: <http://mechatronics.ru/2010/12> (дата обращения: 2.05.2011).