

УДК 681.5:62.50

## РОБАСТНАЯ НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Лубенцова Е.В., Пиотровский Д.Л., Лубенцов В.Ф.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар,  
e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Настоящая статья посвящена разработке робастной системы автоматического управления (САУ) с переменной структурой и минимальной базой правил нечеткого регулятора для управления нестационарным биотехнологическим объектом с запаздыванием. Установлено, что настройку нечеткого регулятора целесообразно осуществлять с использованием номинальной модели, параметры которой получены усреднением возможных их значений в интервалах изменения. Исследованиями установлено, что полученные этим методом настройки нечеткого регулятора не являются оптимальными для стабилизации объекта при наихудшем сочетании его параметров. Поэтому анализ робастного качества управления проведен с использованием модели объекта с наихудшим сочетанием параметров, что позволило сделать вывод о необходимости коррекции структуры системы. Реализован алгоритм коррекции структуры системы с использованием информации о колебаниях регулируемой переменной в системе в ходе переходного процесса.

**Ключевые слова:** нечеткий регулятор, робастная система управления, номинальная модель, наихудшее сочетание параметров, переходный процесс, робастное качество

## ROBUST FUZZY AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH VARIABLE STRUCTURE

Lubentsova E.V., Piotrovskiy D.L., Lubentsov V.F.

Federal State Educational Institution of Higher Education «Kuban State University of Technology»,  
Krasnodar, e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

The robust automatic control system with a minimum base of rules of fuzzy control and variable structure control for uncertain and unsteady biotechnology plant with delay. It was found that the setting of a fuzzy controller is advantageously carried out using the nominal model parameters are obtained by averaging the values of possible changes in the intervals. Studies have confirmed that the obtained by this method fuzzy controller settings are not optimal for stabilizing an object in the worst combination of its parameters. Therefore, the analysis of robust governance carried out using the object model with the worst combination of parameters, which led to the conclusion about the need to adjust the structure of the system. The algorithm of the correction system structures using the information about the fluctuations in the controlled variable.

**Keywords:** fuzzy control, robust control system, the nominal model, the worst combination of parameters, the transient, robust quality

При проектировании систем управления многими динамическими объектами в условиях параметрической неопределенности, как правило, известны только оценки параметров объекта управления в виде верхних и нижних граничных значений, либо задана принадлежность параметров некоторому множеству. К таким объектам относятся биотехнологические объекты стадии ферментации фармацевтических и микробиологических производств [4]. Поэтому проектируемые регуляторы должны обеспечивать устойчивость и качество не одной системы управления, а целого семейства систем, соответствующих различным значениям параметров объекта. Это достигается путем придания системам свойств робастной устойчивости и робастного качества по отношению к параметрическим и иным возмущающим воздействиям за счет выбора структуры системы и синтеза соответствующих алгоритмов управления [1, 8].

Одним из методов синтеза таких алгоритмов управления является использование

аппарата нечеткой логики [2, 7]. Однако общих рекомендаций по синтезу и анализу робастных систем для управления биотехнологическими объектами нет. В связи с этим актуальными являются вопросы анализа и синтеза робастной системы управления с нечетким регулятором на основе принципа переменной структуры, функционирующей в условиях параметрической неопределенности, нестационарности и при наличии запаздывания управляемых биотехнологических объектов. Под переменной структурой в данной работе понимается изменение связей между функциональными блоками нечеткой системы в зависимости от характера колебаний регулируемой переменной в переходном процессе системы.

### Синтез нечеткого регулятора с переменной структурой

Повышение требований к качеству регулирования и увеличение числа факторов, оказывающих значимое влияние на функционирование объектов управления, ведут

в общем случае к усложнению синтезируемых регуляторов. Практика же требует создания регуляторов как можно более простой структуры. К таким регуляторам из типовых можно отнести релейные, двух-, трехпозиционные регуляторы. Однако известно [4], что используемые к настоящему времени позиционные регуляторы не всегда обеспечивают заданное качество регулирования. В связи с этим для улучшения качества позиционного регулирования разработаны модифицированные варианты алгоритмов управления, полученные на основе аппроксимации характеристик нелинейных типовых элементов и различных их комбинаций непрерывными нелинейными функциями типа сигмоидных [4]. К последним относится регулятор, синтезированный на основе аппроксимации характеристик релейного элемента с зоной и без зоны нечувствительности с насыщением, названный аппроксимированным нелинейным функциональным регулятором – АНФ-регулятором [4]. Закон управления, реализуемый этим регулятором, имеет следующий вид:

$$U(\varepsilon) = \left[ \frac{M_1}{1 + \exp(-\lambda \cdot \varepsilon)} - \frac{M_1}{1 + \exp(\lambda \cdot \varepsilon)} \right] + \left[ \frac{M_2}{1 + \exp[-\lambda \cdot (\varepsilon - a)]} - \frac{M_2}{1 + \exp[\lambda \cdot (\varepsilon + a)]} \right], \quad (1)$$

где  $M_1, M_2$  – величина регулирующего воздействия в зоне нечувствительности (ЗН) и за ее пределами соответственно;  $\varepsilon$  – ошибка регулирования;  $\lambda$  – коэффициент, определяющий наклон линейного участка характеристики регулятора;  $2a$  – величина ЗН.

Структурно разрабатываемая интеллектуальная САУ содержит дополнительные блоки, которые выполняются как надстройка над АНФ-регулятором прямой цепи САУ, настраивая нужным образом его параметры (рис. 1). Основная функция, возлагаемая в данном случае на нечеткий регулятор (НР), – это формирование корректирующих поправок к коэффициентам настройки  $M_1, M_2$  АНФ-регулятора в зависимости от текущего значения и скорости изменения ошибки регулирования. Функциональная схема нечеткой системы управления с использованием динамически корректируемого АНФ-регулятора приведена на рис. 1.

Входными сигналами нечеткого регулятора выбраны сигнал рассогласования и его производная. Выходом – величина корректирующего воздействия на параметры  $M_1, M_2$  АНФ-регулятора в прямой цепи системы. Для этого в лингвистических переменных нечеткой логики коррекция параметра  $M_1, M_2$  представлена следующими пятью термами: сильно уменьшить (СМ), уменьшить (М), норма (Н), увеличить (В) и сильно увеличить (СВ).

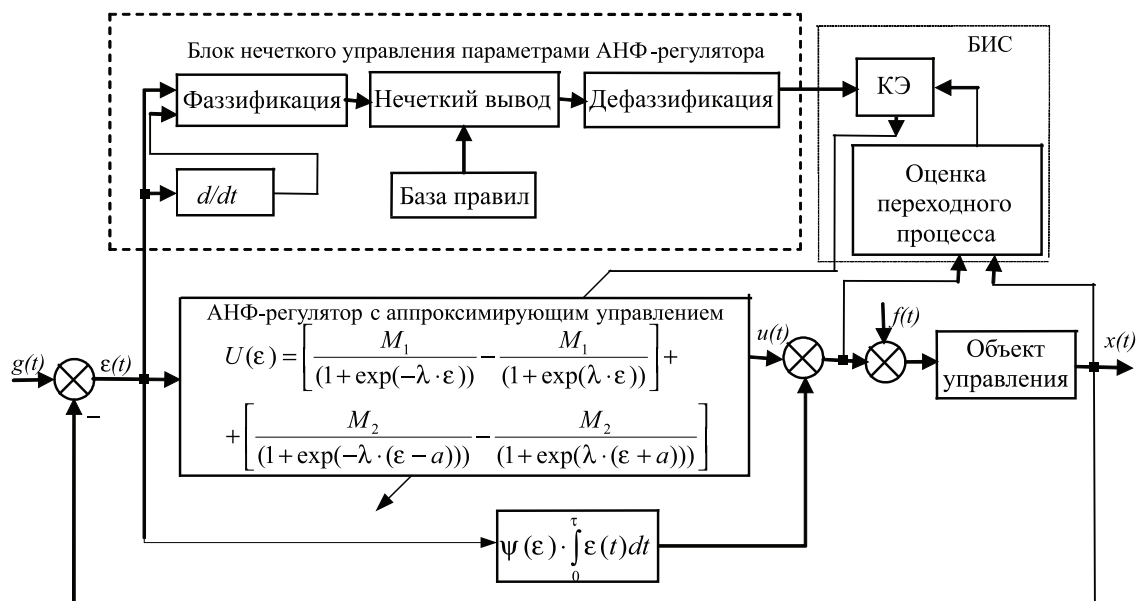
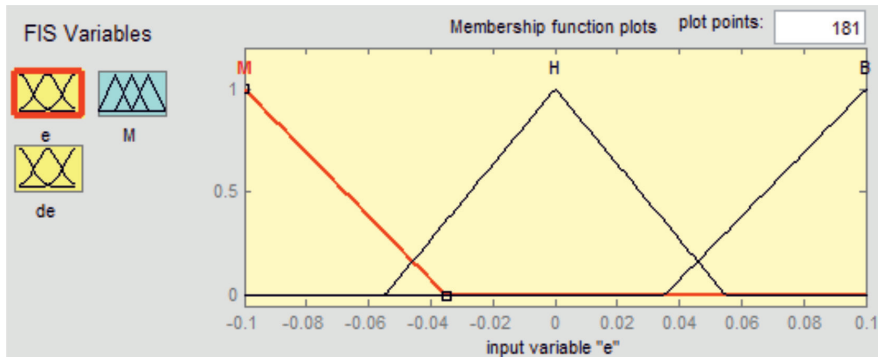
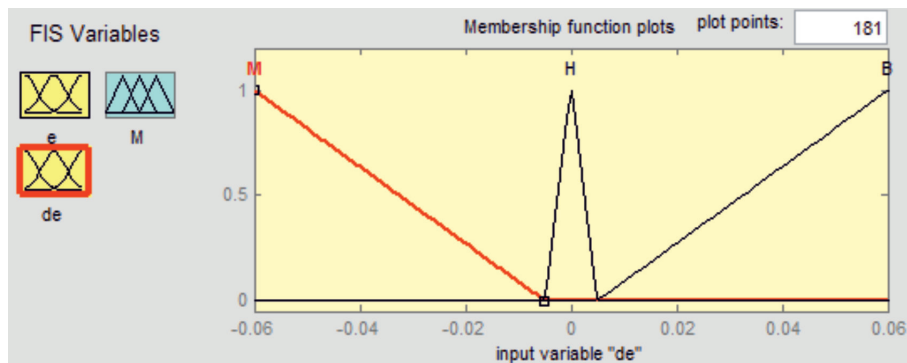


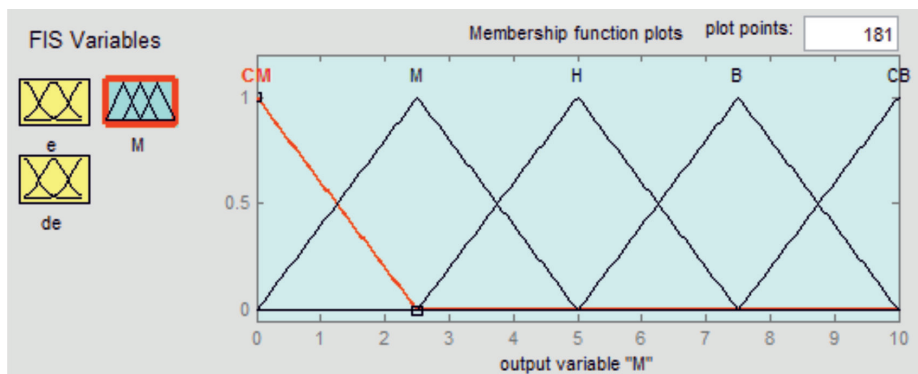
Рис. 1. Структурная схема нечеткой САУ с АНФ-регулятором в прямой цепи:  
КЭ – ключевой элемент; БИС – блок изменения структуры



а)



б)



в)

Рис. 2. Графики функций принадлежности (а – ошибка, б – скорость изменения ошибки, в – корректируемый параметр регулятора)

Форма функций принадлежности для простоты математического описания выбрана треугольной. Числовые значения функций принадлежности выбраны исходя из возможных диапазонов изменения входных и выходной переменных, полученных при экспериментальном исследовании алгоритма аппроксимирующего управления [3, 4].

Известно, что степень пересечения во входных функциях принадлежности сильно влияет на статические характеристики нечеткого регулятора [5]. В то время как маленькие пересечения во входных функциях принадлежности формируют пороговые (ступенчатые) характеристики, большие пересечения делают кривую более гладкой. Пересечения

в выходных функциях принадлежности меньше влияют на характеристику. Как видно из рис. 2, а, функции принадлежности для ошибки регулирования выбраны с небольшим пересечением оснований, так как гладкость кривой обеспечена параметрами аппроксимирующей функции.

Функция принадлежности входного сигнала  $\varepsilon(t)$  имеет два пересечения (перекрестия) на интервалах  $[-0,055; -0,035]$  и  $[0,055; 0,035]$ , которые точно соответствуют диапазонам положительных наклонов кривой. Причиной тому является то, что два правила в этих диапазонах одновременно активны. С другой стороны, на диапазонах без пересечения только одно правило активно. Функция принадлежности выходного сигнала в этом случае зависит только от степени активности и, таким образом, центр тяжести функции принадлежности остается неизменным.

При синтезе системы использован алгоритм логического вывода по Мамдани как наиболее простой и позволяющий выносить суждение о том или ином параметре в виде утверждений, в отличие от их представления линейными функциями, характерного для нечеткого вывода Сугено. Значения функций принадлежности соответствующих нечетких переменных представлены в виде кусочно-линейных графиков, показанных на рис. 2.

Для дефазификации переменных, т.е. для перехода от нечетких выводов к точному значению корректируемого параметра  $M$ , использован метод центра тяжести [9].

Следует заметить, что поскольку объект управления и АНФ-регулятор являются статическими звеньями, то при конечных значениях  $\lambda$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  в замкнутой САУ возникает статическая ошибка. Для сведения ее к нулю и придания системе свойства астатизма в алгоритм управления нечеткой системы с АНФ-регулятором введен интегратор с коэффициентом интегрирования  $\psi(\varepsilon)$ . На основе вышеприведенных соображений и предложенного принципа управления в программном пакете Matlab была реализована система с нечетким регулятором (рис. 1).

### Результаты исследования нечеткой системы управления

В качестве объекта управления рассмотрен биореактор-ферментатор периодического действия по каналу регулирования температуры. При исследовании свойств системы удобно воспользоваться описанием объекта управления в виде передаточных функций [5]. Считаем априори известными значения параметров интервальной модели

объекта, представленной в форме передаточной функции следующего вида:

$$W(p) = \frac{[\underline{K}_{06}, \overline{K}_{06}] \cdot e^{-[\underline{\tau}, \overline{\tau}]p}}{[\underline{T}_2, \overline{T}_2]p^2 + [\underline{T}_1, \overline{T}_1]p + 1}, \quad (2)$$

в которой класс неопределенности задан неравенствами для коэффициента передачи объекта  $\underline{K}_{06} \leq K_{06} \leq \overline{K}_{06}$ , для запаздывания  $\underline{\tau} \leq \tau \leq \overline{\tau}$ , для постоянных времени  $\underline{T}_1 \leq T_1 \leq \overline{T}_1$ ,  $\underline{T}_2 \leq T_2 \leq \overline{T}_2$ . Обозначения  $\underline{K}_{06}$  и  $\overline{K}_{06}$  соответствуют минимальному и максимальному значениям коэффициента передачи объекта. Аналогично и для других параметров модели.

Интервально-заданный объект управления с запаздыванием по каналу регулирования температуры в ферментаторе, аппроксимированный моделью с передаточной функцией вида

$$W(p) = K_{06} \cdot \exp(-\tau p) / (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1), \quad (3)$$

где  $0,087 \leq K_{06} \leq 0,383$ ;  $14,35 \leq T_1 \leq 41,56$ ;  $8,55 \leq T_2 \leq 25,0$ ;  $2,2 \leq \tau \leq 6,0$ , можно представить как семейство квазистационарных объектов.

Учитываем [6], что при описании объекта с параметрической неопределенностью номинальная модель располагается в центре множества. С учетом этого параметры номинальной модели объекта были заданы в виде среднеинтервальных значений:

$$[k_{06}] = [\underline{k}_{06}, \overline{k}_{06}] = \text{mid}[k_{06}] =$$

$$= (\underline{k} + \overline{k}) / 2 = 0,24 \text{ [}^\circ\text{C / M}^3\text{/ч]};$$

$$[\tau] = [\underline{\tau}, \overline{\tau}] = \text{mid}[\tau] =$$

$$= (\underline{\tau} + \overline{\tau}) / 2 = 4,1 \text{ мин};$$

$$[T_1] = [\underline{T}_1, \overline{T}_1] = \text{mid}[T_1] =$$

$$= (\underline{T}_1 + \overline{T}_1) / 2 = 27,96 \text{ мин};$$

$$[T_2] = [\underline{T}_2, \overline{T}_2] = \text{mid}[T_2] =$$

$$= (\underline{T}_2 + \overline{T}_2) / 2 = 16,78 \text{ мин.}$$

где  $\underline{k}_i, \overline{k}_i, \underline{T}_{1i}, \overline{T}_{1i}, \underline{T}_{2i}, \overline{T}_{2i}, \underline{\tau}_i, \overline{\tau}_i$  – нижняя и верхняя граница коэффициента передачи объекта  $k_i$ , постоянной времени  $T_{1i}, T_{2i}$  и запаздывания объекта  $\tau_i$  соответственно;  $\text{mid}[v_i]$  – середина интервального параметра  $[v_i]$ ,  $i = 1, \dots, N$ .

Исследование нечеткой системы управления проведено путем имитационного моделирования при подаче на вход системы задающего воздействия  $\theta_{\text{зад}} = 5 \text{ м.е.}$

и подаче на вход объекта в различные моменты времени единичного ступенчатого воздействия  $f = 10$  м.е. (м.е. – машинные единицы). В качестве значений параметров настройки АНФ-регулятора в основном контуре системы использованы следующие:  $M_1 = M$ ,  $M_2 = M/2$ ;  $\lambda = 0,2456$ ;  $a = 0,1$ ;  $M_1 = 7$ ,  $M_2 = 14$ . Для анализа робастного качества проведены исследование САУ с моделью при неблагоприятном сочетании интервальных параметров объекта, которое характеризует предельно возможное качество робастного управления [1]. Полученные переходные процессы представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что настройка нечеткого АНФ-регулятора, выполненная с использованием номинальной модели объекта, не исключает автоколебания при выводе на режим объекта при наихудшем сочетании параметров и поэтому не является оптимальной. Известно, что значительный ряд технологических процессов, особенно процессов биосинтеза, реакторных, химических и др., не допускает автоколебательного режима. Следовательно, существует необходимость в автоматической подстройке параметров регулятора или коррекции структуры системы. Однако подстройка параметров  $\lambda$  и  $M$  алгоритма управления (1) не приводит к положительному результату. Так, с уменьшением  $M$  уменьшается колебательность, но затягивается переходный процесс и имеет место статическая ошибка (при отсутствии интегрирующего звена). В связи с этим в данной статье рассмотрено решение задачи с помощью изменения структуры системы.

Для изменения структуры САУ (рис. 1) в состав нечеткого регулятора

введена дополнительная корректирующая логическая связь по динамике переходного процесса. Возможны различные оценки динамики переходного процесса. Например, если ошибка большая (положительная или отрицательная) и скорость ее изменения большая, но другого знака, то сигнал управляющего воздействия НР должно быть минимальным, так как ошибка быстро уменьшается. Эта ситуация характерна для колебательного, но затухающего переходного процесса и учитывается базой правил. В случае критической ситуации, т.е. при возникновении автоколебаний, когда знак сигнала управляющего (корректирующего) воздействия НР совпадает со знаком скорости выходной переменной объекта, сигнал управляющего (корректирующего) воздействия НР должен обнуляться и оставаться ненулевым при противоположных знаках. Для критической ситуации оценку динамики переходного процесса можно получить, используя информацию об амплитуде отклонения регулируемой переменной от заданного значения (положительно большое или отрицательно большое).

В установившемся режиме и при других параметрах модели объекта из интервала неопределенности система работает с прежней базой правил, обеспечивая оптимальное соотношение между временем регулирования, максимальной динамической ошибкой и количеством колебаний. Это подтверждается полученными переходными процессами при различных параметрах интервального объекта (рис. 4) и при подаче на вход регулятора и объекта ступенчатых воздействий. Переходные процессы были исследованы для трех режимов:

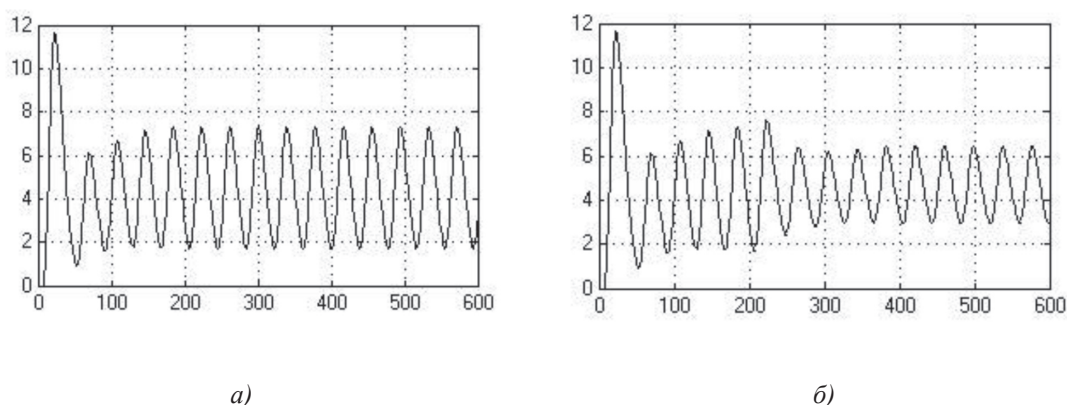


Рис. 3. Переходные процессы в нечеткой САУ при выводе объекта на заданный режим (а) и действии возмущения на входе объекта в момент времени  $t = 200$  мин (б) с моделью с неблагоприятным сочетанием параметров объекта: по оси ординат – регулируемая переменная, по оси абсцисс – время в мин

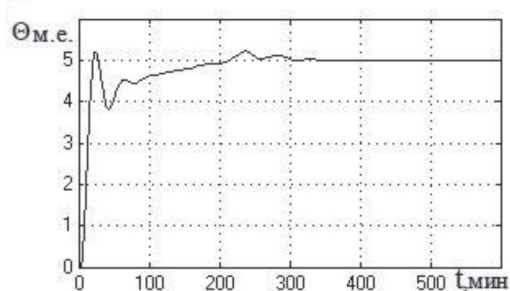


режим 1 – переходный процесс при выводе объекта на установившийся режим при воздействии ступенчатого сигнала по заданию  $\theta_{\text{зад}} = 5$  м.е. в момент времени  $t = 0$ ;

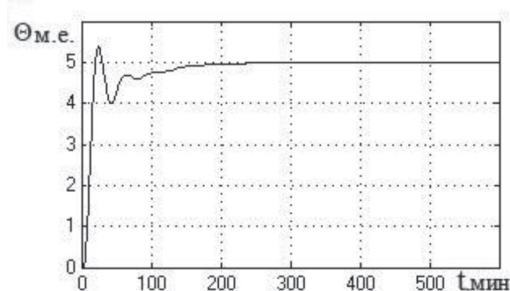
режим 2 – переходный процесс при выводе объекта на установившийся режим при воздействии ступенчатого сигнала по заданию  $\theta_{\text{зад}} = 5$  м.е. в момент времени  $t = 0$  с и ступенчатого возмущения на входе объекта  $f = 10$  м.е., действующего в момент

времени  $t = 200$  мин, демпфированного звеном с передаточной функцией  $W(p) = 0,2/(20p + 1)$  (поскольку мгновенные скачки в технологии отсутствуют);

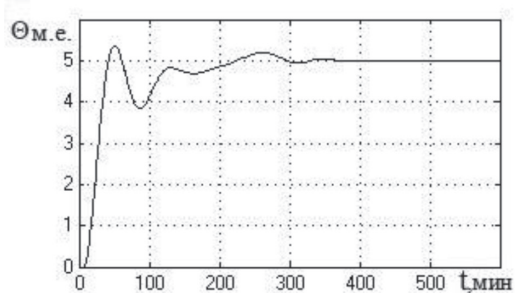
режим 3 – переходный процесс при выводе объекта на установившийся режим при воздействии ступенчатого сигнала по заданию  $\theta_{\text{зад}} = 5$  м.е. и скачкообразного возмущения на входе объекта  $f = 10$  м.е. в момент времени  $t = 0$ .



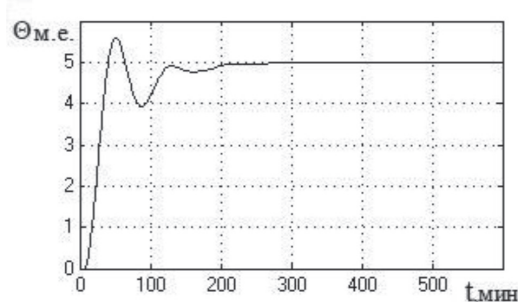
а)



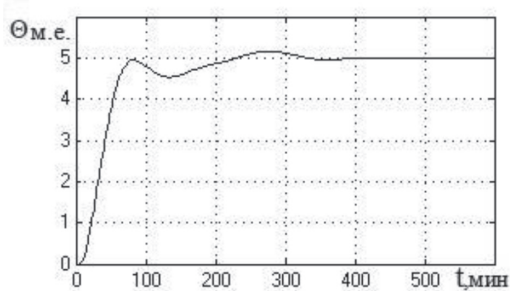
б)



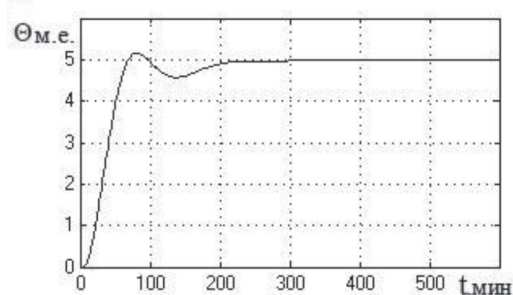
в)



г)



д)



е)

Рис. 4. Графики переходных процессов в нечеткой САУ биореактором в режимах 1 и 2 (а, в, д) и режиме 3 (б, г, е) для модели объекта с параметрами: а, б –  $T_1 = 18,36$  мин;  $T_2^2 = 104,74$  мин<sup>2</sup>;  $K = 0,187$ ;  $\tau = 2,2$  мин; в, г –  $T_1 = 27,26$  мин;  $T_2^2 = 299,34$  мин<sup>2</sup>;  $K = 0,128$ ;  $\tau = 6$  мин; д, е –  $T_1 = 41,56$  мин;  $T_2^2 = 625,72$  мин<sup>2</sup>;  $K = 0,104$ ;  $\tau = 4$  мин

Графики переходных процессов представлены на рис. 4.

Из полученных процессов регулирования видно, что нечеткая система с переменной структурой исключает недопустимые автоколебания в системе (сохраняя при наихудшем значении запаздывания объекта  $\tau_{\max} = 6$  мин незначительные колебания регулируемой переменной в установившемся режиме).

### Заклучение

Разработанная структура САУ с минимальной базой правил нечеткого регулятора позволяет реализовывать робастную систему управления неопределенным и нестационарным биотехнологическим объектом с запаздыванием. При этом настройку НР целесообразно осуществлять с использованием номинальной математической модели объекта, параметры которой находятся усреднением их возможных значений в интервалах изменения. Анализ робастного качества управления целесообразно проводить с использованием модели объекта с наихудшим сочетанием параметров, значения которых принимаются из предельно возможных их изменений.

### Выводы

К достоинствам разработанной нечеткой системы управления с переменной структурой, относящейся к категории интеллектуальных систем управления, можно отнести следующие возможности:

- реализовать любой требуемый для интервального объекта с запаздыванием нелинейный алгоритм управления, в том числе полученный на основе аппроксимации нелинейных характеристик с помощью сигмоидных функций;

- осуществлять настройку регулятора с аппроксимирующим управлением при неполном и неточном описании интервального объекта управления с запаздыванием при минимальной базе правил и количестве настроечных параметров;

- исключить предельные и резкие значения управлений при неопределенности параметров и возмущений и реализовать коррекцию, обеспечивающую робастность системы при неустойчивости параметров объекта.

Построение системы управления на базе нечеткой логики является наиболее приемлемым вариантом построения САУ биотехнологическим объектом, а также другими объектами, аналогичными ему по динамическим и статическим свойствам.

### Список литературы

1. Бобцов А.А. Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу. – СПб.: Наука, 2011. – 174 с.
2. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных/интеллектуальных систем / Л.А. Заде. – Новости Искусственного Интеллекта. – 2001. – № 2–3. – С. 7–11.
3. Лубенцов В.Ф. Математическое описание и динамика систем с непрерывными аппроксимирующими функциями управления // Наука и технологии: Труды XXV Российской школы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – С. 269–271.
4. Лубенцов В.Ф. Системы автоматического управления процессами ферментации : монография. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2005. – 200 с.
5. Преобразование вход-выход [Электронный ресурс] [http://life-prog.ru/1\\_22017\\_preobrazovanie-vhod-vihod.html](http://life-prog.ru/1_22017_preobrazovanie-vhod-vihod.html).
6. Торгашев А. Ю. Синтез систем управления для массообменных технологических процессов в условиях неопределенности : автореф. дис. ... д-р техн. наук: 05.13.06, 05.13.01. – М., 2010. – 44 с.
7. Усков А.А., Круглов В.В. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. – Смоленск: Смоленская городская типография, 2003. – 177 с.
8. Честнов В.Н., Самшорин Н.И. Синтез робастных регуляторов при параметрической неопределенности и внешних возмущениях // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – Москва 16–19 июня 2014 г. – С. 1033–1045.
9. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику проекта [Электронный ресурс]: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/>.

### References

1. Bobcov A.A. Adaptivnoe i robastnoe upravlenie neopredelennymi sistemami po vyhodu. SPb.: Nauka, 2011. 174 p.
2. Zade L.A. Rol mjagkih vychislenij i nechetkoj logiki v ponimanii, konstruirovanii i razvitii informacionnyh/intellektualnyh sistem / L.A. Zade. Novosti Iskusstvennogo Intellekta, 2001. no. 2–3, pp. 7–11.
3. Lubencov V.F. Matematicheskoe opisanie i dinamika sistem s nepreryvnymi approksimirujushimi funktsijami upravlenija // Nauka i tehnologii: Trudy XXV Rossijskoj shkoly. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. pp. 269–271.
4. Lubencov V.F. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija processami fermentacii : mono-grafija. Stavropol: SevKavGTU, 2005. 200 p.
5. Preobrazovanie vhod-vyhod [Jelektronnyj resurs] [http://life-prog.ru/1\\_22017\\_preobrazovanie-vhod-vihod.html](http://life-prog.ru/1_22017_preobrazovanie-vhod-vihod.html).
6. Torgashev A. Ju. Sintez sistem upravlenija dlja massoobmennyh tehnologicheskikh processov v uslovijah neopredelennosti : avtoref. dis. ... d-r tehn. nauk: 05.13.06, 05.13.01. M., 2010. 44 p.
7. Uskov A.A., Kruglov V.V. Intellektualnye sistemy upravlenija na osnove metodov ne-chetkoj logiki. Smolensk: Smolenskaja gorodskaja tipografija, 2003. 177 p.
8. Chestnov V.N., Samshorin N.I. Sintez robastnyh reguljatorov pri parametricheskoj neop-redelennosti i vneshnih vozmushhenijah // XII vsrossijskoe soveshhanie po problemam uprav-lenija VSPU-2014. Moskva 16–19 ijunja 2014 g. pp. 1033–1045.
9. Shtovba S.D. Vvedenie v teoriju nechetkih mnozhestv i nechetkiju logiku proekta [Jelek-tronnyj resurs]: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/>.