

УДК 681.5.01:658.512

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Лубенцов В.Ф.

Невинномысский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Невинномысск, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru

Обработка нечеткой информации и нечеткий вывод давно применяются в различных интеллектуальных системах, однако их использование для разработки корректирующих устройств в системах автоматического управления (САУ) исследовано недостаточно. Как показали предварительные исследования, нечеткий корректор целесообразно использовать в качестве корректирующего устройства к регулятору основного контура САУ с помощью анализа качества переходных процессов. При этом подход к корректировке настроек относительно номинальных значений может быть качественным или нечетким, т.е. в виде лингвистических правил, составленных опытными наладчиками-экспертами. Отмечено, что при общей структуре нечеткие регуляторы отличаются количеством правил и алгоритмом преобразования результата в числовое значение логического вывода. Для составления базы правил используются результаты проведенных нами исследований о влиянии параметров алгоритма управления на переходные процессы и данные об интервале значений этих параметров, полученных в ходе проведения компьютерного моделирования системы. Для синтеза интеллектуальной системы управления объектом в переходном и установившемся режимах рассмотрено формирование двух переключаемых баз правил нечеткого контроллера. Показана дополнительная возможность повышения эффективности нечеткого управления за счет использования двух фаззи-блоков с различным количеством термов, последовательно реализуемых в зависимости от состояния переходного процесса в системе. Причем в первом фаззи-блоке размещено меньшее количество продукционных правил, обработка которых занимает меньше времени, чем во втором фаззи-блоке, который срабатывает только после оценки состояния переходного процесса и необходимости его улучшения. Следует отметить, что в классических нечетких регуляторах такая возможность отсутствует.

Ключевые слова: нечеткая система, переключение баз правил, переходный режим, установившийся режим, моделирование

INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM WITH VARIABLE STRUCTURE ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

Lubentsov V.F.

The Nevinnomyssk technological institute (branch) FGAOU VPO «North Caucasian Federal University», e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru

Processing of fuzzy information and fuzzy conclusion are applied in various intellectual systems long ago, however their use for development of correcting devices in the systems of automatic control (SAC) is insufficiently investigated. As showed preliminary researches, it is expediently to use the fuzzy-corrector as the correcting device to the regulator of the main contour of SAC by means of the analysis of quality of transition processes. Thus approach to correction of settings of rather nominal rates can be qualitative or fuzzy, i.e. in the form of the linguistic rules made by skilled servicemen experts. It is noted that in the general structure fuzzy regulators differ by number of rules and algorithm of transformation of result to numerical value of a logical conclusion. For composition of base of rules results of the researches about influence of parameters of algorithm of management on transition processes and data on an interval of values of these parameters received during computer modeling of system are used. For synthesis of intellectual control system object to transient and steady modes discussed the formation of two switchable databases rules of fuzzy controller. Shows an additional possibility of increasing the efficiency of fuzzy control by the use of two fuzzy-blocks with different number of terms, which are consistently implemented depending on the condition transition process in the system. And in the first fuzzy-block is placed a smaller number of production rules, working out which takes less time than the second fuzzy block, which is triggered only after assessing the state of the transition process and the need to improve it. It should be noted that in the classical fuzzy controllers this is not possible.

Keywords: fuzzy system, switching databases rules, transient and steady mode, simulation

В теории автоматического управления существует достаточно много методов, позволяющих оптимизировать работу систем по тем или иным критериям качества при выполнении ряда ограничений. Например, известно, что ПИД-регулятор считается достаточно близким к оптимальному, основанному на теории предсказания Колмогорова – Винера [6, 7, 8]. Однако может оказаться, что при возрастании требований

к качеству управления объектами, функционирующими в переходных и установившихся режимах, быстрдействие и динамическая точность регулирования с типовыми ПИ, ПИД-регуляторами и позиционными (релейными) регуляторами САУ становятся недостаточными. С позиций системного подхода практически все обычные системы должны быть отнесены к системам с неполной информацией о модели объекта.

В связи с этим целесообразным становится использование методов интеллектуального управления, для которого характерен ряд преимуществ [2, 3, 5]. Приведем некоторые из них: во-первых, интеллектуальные системы сохраняют устойчивость при изменении параметров объекта управления в определенных пределах; во-вторых, они имеют существенно меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с оптимальными системами; в-третьих, интеллектуальное управление не требует точных математических объектов управляемых объектов, а в некоторых случаях позволяет обойти этап получения номинальной (расчетной) модели объекта; в-четвертых, на основе нечеткой логики позволяет использовать знания специалистов-наладчиков с целью настройки регуляторов в супервизорном режиме [1]. Однако в известных методах синтеза интеллектуальных систем с помощью нечетких регуляторов набор решающих правил является фиксированным и неизменным в процессе функционирования динамической системы. Модификация правил в случае ухудшения качества замкнутой системы невозможна без участия эксперта и не всегда согласуется со скоростью реакции системы, особенно при управлении быстро протекающими процессами.

В данной работе предложен подход к структурно-параметрическому синтезу системы программного управления и робастной стабилизации сложного объекта на основе методов нечеткой логики и переменной структуры. В основном контуре системы управления использован нелинейный регулятор с аппроксимирующей функцией управления, предложенный в работе [4]. Для программной системы, функционирующей в переходном и установившемся режимах, использованы два фаззи-блока с различным количеством термов, последовательно реализуемых в зависимости от состояния переходного процесса в системе. Причем в первом фаззи-блоке размещено меньшее количество термов, чем во втором фаззи-блоке, который срабатывает только после оценки состояния переходного процесса на заданном интервале времени и необходимости его улучшения после использования алгоритма нечеткой логики в первом фаззи-блоке.

Основная часть

Входными переменными предлагаемого фаззи-алгоритма являются ошибка регулирования (ϵ) и ее производная ($d\epsilon/dt$), а выходной переменной – значение корректирующего сигнала (λ_k) алгоритма управ-

ления. При синтезе системы использованы фаззификация треугольными функциями принадлежности и 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.

Для составления полного ряда правил и функций принадлежности используются общие знания о влиянии параметра λ алгоритма управления с аппроксимирующей нелинейной функцией [4] на переходные процессы и знания, полученные из проведения моделирования системы, об интервале значений $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ параметра настройки λ , обеспечивающих устойчивость системы. Это дает возможность начинать процесс подстройки параметра λ с использований рациональных значений, что ускоряет процесс поиска, особенно в условиях неопределенности. В лингвистических переменных нечеткой логики коррекция параметра λ в первом фаззи-корректоре представлена тремя термами: уменьшить (М), норма (Н) и увеличить (В). Для улучшения качественных характеристик системы рассмотрена более детальная нечеткая декомпозиция с пятью термами. Для этого в лингвистических переменных нечеткой логики коррекция параметра λ во втором фаззи-корректоре представлена следующими пятью термами: сильно уменьшить (СМ), уменьшить (М), норма (Н), увеличить (В) и сильно увеличить (СВ). Для перехода от нечетких выводов к корректирующему воздействию использована формула дефаззификации по методу центра тяжести.

Рассмотрим систему управления, обеспечивающую отслеживание входного задающего сигнала и стабилизацию объекта с помощью динамической коррекции параметра λ регулятора с аппроксимированной нелинейной функцией управления (нами обозначен как АНФ-регулятор) на основе переключаемых баз правил (БП). При этом реализованы две простые базы правил БП1 и БП2, состоящие соответственно из 3-х и 5-и терм. Границы переключения БП определяются сигналами, характеризующими качество исследуемой системы. На начальном этапе функционирования системы необходимо высокое быстроедействие. Поэтому здесь целесообразно использовать БП2 с такими термами, как «сильно увеличить» или «сильно уменьшить», которые достаточно чувствительны к таким входным сигналам, как «скорость изменения входной переменной высокая», «ошибка регулирования большая» и т.д. Но недостатком такого

управления являются большие значения выходного управляющего воздействия при приближении к заданному значению. На этом этапе целесообразно использовать алгоритм робастной стабилизации с другой базой правил, более чувствительный к ошибке регулирования. Поэтому по истечении некоторого времени имеет смысл переключить управление на менее форсированное – стабилизирующее, которое обеспечивается базой правил БП1, также достаточно простой. Для стабилизирующего управления характерно сильное замедление скорости изменения входного сигнала и уменьшение ошибки регулирования, что учитывается в БП1. Благодаря чему стабилизирующее управление позволяет более точно отследить задающий сигнал (без существенного перерегулирования).

На рис. 1 приведена структурная схема системы с двумя фаззи-корректорами и логическими блоками, обеспечивающими

выбор и переключение БП. Для этого в системе задаются пороговые максимальный верхний E_1 и нижний E_2 уровни отклонения (ε) выходной переменной от задания, а также задается максимально допустимое время устранения отклонения ($T \approx (3 \dots 5)T_p$, где T_p – длительность переходного процесса). С учетом этого в блоке 1 вычисляются величины

$$S_1 = \max(|\varepsilon| - E_1) \text{ и } S_2 = \max(|E_2| - |\varepsilon|),$$

на основании которых оценивается необходимость подключения фаззи-корректора с той или иной базой правил. При этом чем продолжительнее отклонение от порогового значения, тем большим должно быть корректирующее воздействие АНФ-регулятора. С учетом изложенного условия переключения реализованы в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\text{если } (|\varepsilon| - E_1) > 0 \text{ и } T \geq 3T_p \text{ и БП} = \text{БП2 и } \lambda_k = f_1(\varepsilon, d\varepsilon/dt), \\ &\quad \text{то выбрать БП} = \text{БП1 иначе БП} = \text{БП2;} \\ &\text{если } (|E_2| - |\varepsilon|) < 0 \text{ и } T \geq 3T_p \text{ и БП} = \text{БП1 и } \lambda_k = f_2(\varepsilon, d\varepsilon/dt), \\ &\quad \text{то выбрать БП} = \text{БП2 иначе БП} = \text{БП1.} \end{aligned} \quad (1)$$

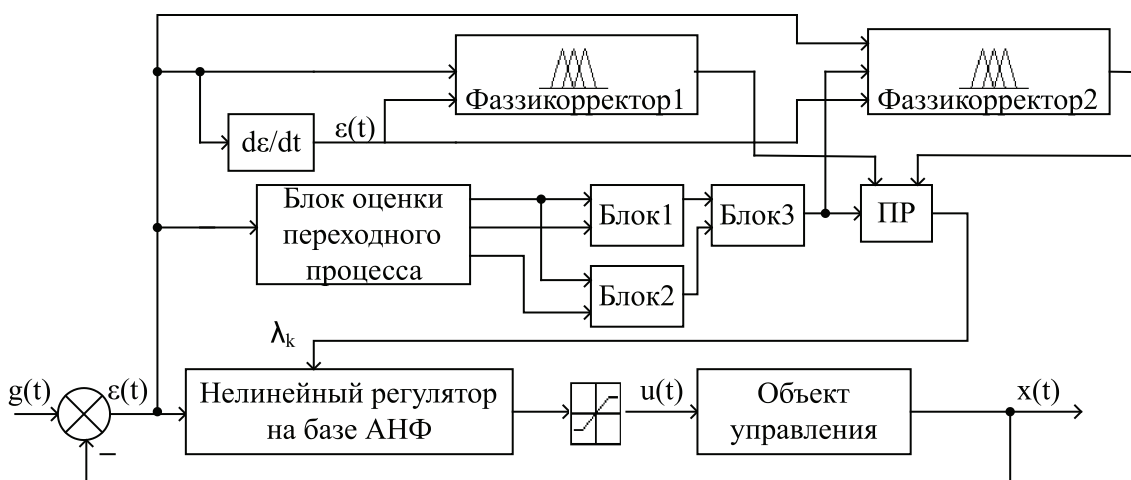


Рис. 1. Структурная схема системы управления с двумя фаззи-корректорами

Опишем кратко работу системы. Пусть в установившемся режиме на вход переключающего реле ПР поступает корректирующее воздействие λ_k с выхода фаззи-корректора 1. При превышении ошибкой регулирования первого порогового значения E_1 начинается отсчет времени блоком 2 и вычисление величин S_1 и S_2 . В логическом блоке 3 проверяются условия переключения (1). При выполнении условий (1) блок 3

формирует командный сигнал на управляющий вход ПР, на второй вход которого подключен выход фаззи-корректора 2. В этом случае ПР осуществляет подключение выхода фаззи-корректора 2 на вход АНФ-регулятора, изменяя настроечный параметр λ_k в соответствии с новой базой правил. По истечении времени T , равного $3T_p$ (T_p – время регулирования), величины S_1 и S_2 обнуляются и цикл повторяется заново.

Исследование переходных процессов проведено при подаче на вход системы скачкообразного изменяющегося сигнала задания $g(t)$. В качестве объекта управления рассмотрен биореактор по каналу управления «расход хладагента – температура в реакторе». Объект управления представляет собой последовательное соединение аperiodического звена второго порядка и звена запаздывания, его передаточная функция равна

$$W_{об}(p) = 0,383 \cdot e^{-6p} / (625,5p^2 + 14,35p + 1).$$

Рассматриваемая система реализована с помощью среды MatLab версии 6,5. Исследование переходных процессов проведено при подаче на вход системы скачкообразного изменяющегося сигнала задания по закону:

$$g(t) = \begin{cases} 5(t) & \text{при } 0 \leq t < 400; \\ 8(t) & \text{при } 400 \leq t < 800; \\ 5(t) & \text{при } 800 \leq t \leq 1400. \end{cases}$$

На рис. 2, 3 приведены переходные процессы в программной системе управления

с одной и двумя базами правил. В результате исследований установлено, что подбором условий переключения БП, определяющей веса корректирующих воздействий в зависимости от значений $\varepsilon(t)$ и $d\varepsilon(t)/dt$, можно получить монотонные переходные процессы и процессы без существенного перерегулирования с приемлемым временем регулирования. Как видно из рис. 2, на первом участке программы имеется нарушение нижней границы отклонения ошибкой регулирования. В течение заданного времени АНФ-регулятор с базой правил БП1 обеспечивает достижение заданного значения регулируемой переменной в колебательном режиме. При наличии в системе второй базы правил БП2 и при тех же условиях протекания переходного процесса на первом участке программы осуществляется подключение базы правил БП2, что обеспечивает более эффективную коррекцию параметра λ функции управления АНФ-регулятора, устранение колебаний и сокращение времени переходного процесса в 1,7 раза при его монотонном затухании. Однако переходный процесс на втором участке программы протекает с перерегулированием $\sigma = 6,87\%$.

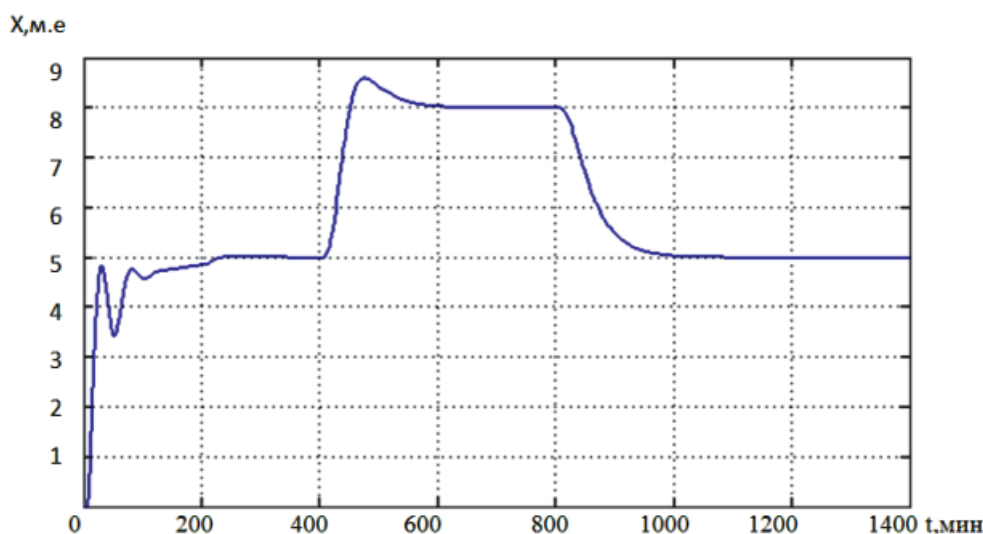


Рис. 2. Кривые переходных процессов в нечеткой системе программного управления объектом 2-го порядка с базой правил: на первом участке с БП1; на втором и третьем участках с БП2

В таблице приведены сравнительные оценки показателей качества переходных процессов в рассматриваемой системе управления и в системе с одной базой правил: максимальное динамическое отклонение – A_{max} , величина перерегулирования – σ , степень затухания – ψ , длительность переходного процесса $T_{ин}$. Для системы с двумя БП в таблице приведены оценки показателей качества для наихудшего переходного

процесса из представленных на рис. 2. Как видно из полученных оценок, переходные процессы в системе с двумя БП являются в основном либо монотонными, либо аperiodическими на всех интервалах исследования системы. Такой характер переходных процессов объясняет большее время переходного процесса по сравнению с системой управления с нечеткой логикой на основе одной базы правил.

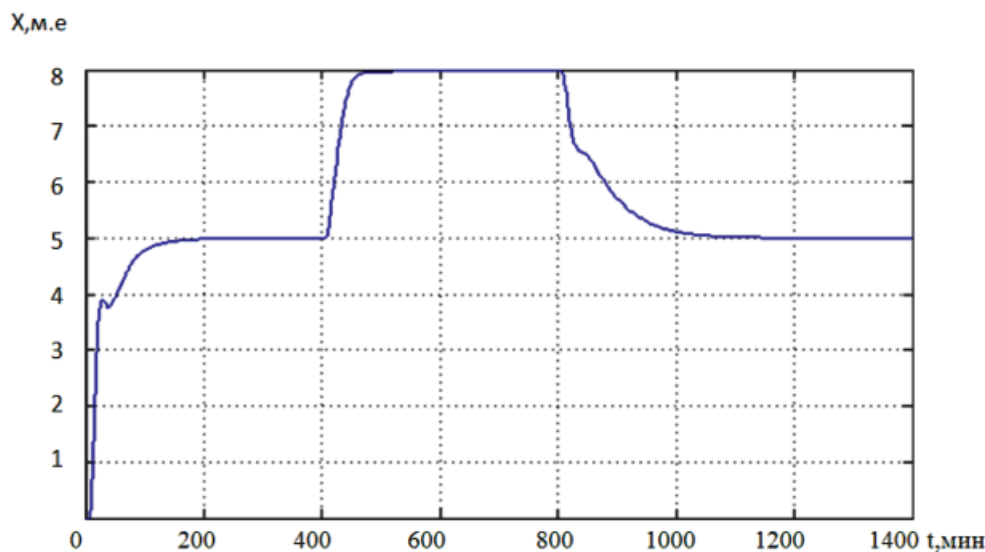


Рис. 3. Кривые переходных процессов в нечеткой системе программного управления объектом 2-го порядка с базой правил: на первом участке с БП1; на втором и третьем участках с БП2

Оценки показателей качества переходного процесса в системе с нечетким АНФ-регулятором с двумя базами правил (БП)

Значения параметров модели объекта управления					Показатели качества переходного процесса в системе								
					структура САУ	нечеткий АНФ-регулятор с двумя БП				нечеткий АНФ-регулятор с одной БП			
№ п/п	$K_{об}$, ед. вых/ед.вх.	τ , мин	T_1 , мин	T_2^2 , мин ²		A, ед.	σ , %	ψ , ед	$T_{пп}$, мин	A, ед	σ , %	ψ , ед	$T_{пп}$, мин
1	0,1411	4,0	25,50	233,48	2-1-1	0**	0	0	200	0,24	4,8	1,0	120
2	0,2298	4,1	27,96	281,57	2-1-1	0	0	0	150	0,64	12,8	0,44	212
3	0,0766	6,0	41,56	73,10	2-1-1	0	0	0	200	0,25	5,0	1,0	200
4	0,3830	6,0	41,56	73,10	1-2-2	1,0	12,5	1,0*	125	1,55	31,0	0,77	275
5	0,0766	6,0	14,35	625,50	2-1-1	0	0	0	200	0	0	0	200
6	0,3830	6,0	14,35	625,50	1-2-2	2,2	27,5	0,86	175	0,09	1,8	1,0	62,8
7	0,0766	6,0	41,56	625,50	2-1-1	0	0	0	175	0,27	5,4	1,0	162,5
8	0,3830	6,0	41,56	625,50	2-1-1	1,1	22,0	1,0	125	1,55	31,0	0,77	250

Примечания: * степень затухания $\psi = 1$ соответствует аperiodическому переходному процессу; ** нули в строке соответствуют монотонному переходному процессу (без перерегулирования). Совокупность всех правил для нечеткой переменной с функцией принадлежности с тремя термами обозначена базой правил 1 (БП1), а совокупность всех правил для нечеткой переменной с функцией принадлежности с пятью термами обозначена базой правил 2 (БП2).

Последовательность цифр 2-1-1, 1-2-2 и т.д. соответствует реализации баз правил второй, первой и первой или первой, второй и второй и т.д.

Заключение

Таким образом, из полученных результатов следует, что САУ с переключением баз правил значительно лучше справляется с двумя основными задачами: программным управлением и робастной стабилизацией

объекта, поскольку обеспечивает наибольшее среднее качество управления и более высокую робастность по сравнению с САУ с одной базой правил. В результате исследований установлено, что подбором условий переключения баз правил, не увеличивая число лингвистических переменных и не расширяя БП, можно получить монотонные переходные процессы и процессы без существенного перерегулирования с приемлемыми показателями качества регулирования.

Список литературы

1. Анисимов Д.Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления / Д.Н. Анисимов // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2001. – № 8. – С. 39–42.

2. Городецкий А.Е. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем / А.Е. Городецкий, И.И. Тарасова. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 336 с.

3. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем http://zadeh.narod.ru/ZADEH_Rol_mjagkikh_vychislenij.html.

4. Лубенцов В.Ф. Исследование динамики систем с непрерывными аппроксимирующими функциями управления // Наука и технологии. Ч.2. – М.: РАН, 2005.

5. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова. – 2 изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.

6. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учебник для студентов вузов. – 4-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 400 с.

7. Ротач, В.Я. Расчет настройки реальных ПИД регуляторов // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 31–35.

8. Смирнов, Н.И. Оптимизация одноконтурных АСР с многопараметрическими регуляторами / Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 7. – С. 24–28.

References

1. Anisimov, D.N. Ispol'zovanie nechetkoj logiki v sistemah avtomaticheskogo upravlenija // Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika. 2001, no. 8. pp. 39–42.

2. Gorodeckij, A. E. Nечetкое matematichesкое modelirovanie ploho formalizuemyh pro-cessov i sistem / A.E. Gorodeckij, I.I. Tarasova. SPb.: Izd-vo politehn. un-ta, 2010. 336 p.

3. Zade, L.A. Rol' mjagkih vychislenij i nechetkoj logiki v ponimanii, konstruirovanii i razvitii informacionnyh intellektual'nyh sistem http://zadeh.narod.ru/ZADEH_Rol_mjagkikh_vychislenij.html

4. Lubencov V.F. Issledovanie dinamiki sistem s neprevnyymi approksimirujushhimi funkcijami upravlenija // Nauka i tehnologii. Ch.2. M.: RAN, 2005.

5. Metody robastnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravlenija / Pod red. N.D. Egupova. 2 izd.– M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2002. 744 p.

6. Rotach, V.Ja. Teorija avtomaticheskogo upravlenija : uchebnik dlja studentov vuzov. 4-e izd. M.: Izd-vo MJEI, 2007. 400 p.

7. Rotach, V.Ja. Raschet nastrojki real'nyh PID reguljatorov // Teploenergetika. 1993. no. 10. pp. 31–35.

8. Smirnov, N.I. Optimizacija odnokonturnyh ASR s mnogoparametricheskimi reguljatorami / N.I. Smirnov, V.R. Sabanin, A.I. Repin // Promyshlennye ASU i kontrollery. 2005. no. 7. pp. 24–28.

Рецензенты:

Червяков Н.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования, Институт математики и естественных наук, ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет» Минобрнауки РФ, г. Ставрополь;

Калмыков И.А., д.т.н., профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем, Институт информационных технологий и телекоммуникаций, ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет» Минобрнауки РФ, г. Ставрополь.

Работа поступила в редакцию 05.12.2014.