

УДК 681.515

НЕПРЕРЫВНЫЙ ИММУННЫЙ САМОНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ ПИД-РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

А. И. Бобиков, к.т.н., доцент кафедры АИТУ РГРТУ; tanya.bubnova.94@mail.ru

Т. С. Бубнова, инженер-программист ООО ИЦ «Единый информационный стандарт» при РГРТУ; tanya.bubnova.94@mail.ru

А. А. Попова, «font-end» разработчик «Index Studio»; tanya.bubnova.94@mail.ru

Важнейшей задачей теории управления является разработка эффективных методов управления. В этой статье для повышения качества системы управления объектом с запаздыванием предлагается использовать в рамках управления с внутренней моделью комбинацию традиционного ПИД-регулятора и иммунного регулятора, что дает возможность в некоторой степени повысить быстродействие управления. Предлагается методика управления, связанная с заменой обычного ПИД-регулятора на самонастраивающийся нечеткий ПИД-регулятор. Описываемый метод интегрирует преимущества самонастраивающегося и иммунного регуляторов. Влияние запаздывания объекта уменьшается с помощью применения модифицированного предиктора Смита.

Ключевые слова: объект с запаздыванием, предиктор Смита, непрерывный иммунный регулятор, ПИД-регулятор, биоинспирированные алгоритмы управления, нечеткая логика, передаточная функция (ПФ).

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-145-151

Введение

На сегодняшний день в автоматическом управлении все чаще стали применяться алгоритмы, работа которых основана на процессах, протекающих в живых организмах. Существуют многочисленные методы управления объектом с запаздыванием с помощью биоинспирированных алгоритмов для дискретных систем. Например, в [2] описывается метод построения и настройки системы с дискретным иммунным регулятором в качестве управляющего устройства, где поиск параметров регулятора осуществляется с помощью генетического алгоритма. Другие авторы [3] предлагают использовать модель системы управления с ПИД (пропорционально-интегрально-дифференцирующим) и иммунным регуляторами и ручной настройкой их коэффициентов. В более поздних работах использование иммунного и ПИД-регуляторов уже предлагается для объекта с запаздыванием, где негативное влияние запаздывания уменьшается за счет модифицированного предиктора Смита [4]. Однако ни один из предложенных в литературе методов не используется для непрерывных объектов. Вместе с тем необходимо учитывать то обстоятельство, что практически все технические объекты управления, для которых проектируются иммунные регуляторы, являются непрерывными устройствами. Кроме того, применение цифро-

вых иммунных регуляторов приводит к введению дополнительных устройств ЦАП и АЦП. Тогда возникает задача выбора периода дискретизации для физического осуществления цифровых иммунных систем. В отечественной промышленности в основном задействованы непрерывные регуляторы, в том числе и ПИД-регулятор. Отсюда введение цифровых иммунных регуляторов приводит к необходимости применения цифровых ПИД-регуляторов, что во многих случаях сопряжено с определенными трудностями [1].

В данной работе описано управляющее устройство для непрерывных систем с транспортным запаздыванием. Предлагается осуществить синтез иммунного и ПИД-регуляторов, где коэффициенты ПИД-регулятора самонастраиваются за счет применения нечеткой логики. Применение модифицированного предиктора Смита, который осуществляется на основе управления с внутренней моделью, позволяет не учитывать влияние запаздывания при расчете управляющего устройства.

Модифицированный предиктор Смита

В начале проектирования необходимо уменьшить влияние запаздывания на работу системы управления и лишь затем приступить к разработке управляющего устройства для повышения эффективности управления.

В данной работе применяется метод управления с внутренней моделью, основной идеей которого является явное включение в структуру системы управления модели с передаточной функцией (ПФ) $\tilde{W}(p) = \tilde{W}_1(p)e^{-p\tau}$ реального объекта, описываемого ПФ $W(p) = W_1(p)e^{-p\tau}$. Такая структура позволит вынести элемент запаздывания за пределы замкнутого контура, что дает возможность проектирования регулятора без учета запаздывания.

В данной работе используется управление с помощью модифицированного предиктора Смита, который схематично представлен на рисунке 1 [1]. Идея этого метода – явно включить модель объекта в структуру системы управления [12, 13].

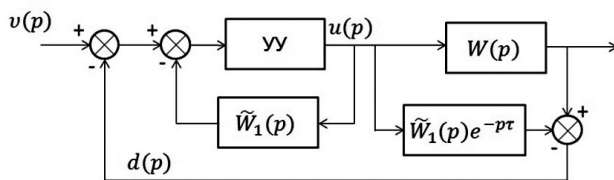


Рисунок 1 –Модифицированный предиктор Смита

На рисунке 1 $\tilde{W}_1$ – передаточная функция (ПФ) свободной от запаздывания части модели ОУ, $W(p)$ – ПФ реального объекта, τ – время запаздывания, УУ – это управляющее устройство или регулятор, который используется без учета запаздывания.

В качестве управляющего устройства чаще всего используют ПИД-регуляторы или иные линейные регуляторы [14]. Однако в целях повышения эффективности воспользуемся самонастраивающимся ПИД-регулятором.

Самонастраивающийся ПИД-регулятор

При проектировании комбинации иммунного и ПИД-регуляторов воспользуемся законом управления следующего вида

$$u(t) = K_p \left(\frac{du}{dt} \right) e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + \frac{K_d de}{dt}, \quad (1)$$

где K_i , K_p и K_d – коэффициенты интегрирующего, пропорционального и дифференцирующего звена ПИД-регулятора соответственно.

Для настройки ПИД-регулятора воспользуемся методом Циглера-Николса [15], в результате чего получим эффективную систему управления. Однако в [16] было показано, что эффективность управления можно повысить за счет использования самонастраивающегося ПИД-регулятора, работающего на базе нечеткой логики [4].

Нечеткий самонастраивающийся ПИД-регулятор является комбинацией нечеткого контроллера (НК) и классического ПИД-регулятора [6].

В основе регулятора лежит использование нечетких правил, которые формулируются на основе свойств объекта управления. Для настройки нечеткого контроллера используется упрощенный метод нечеткого логического вывода, разработанный в 1974 году Мамдани и носящий название максиминной инференции Мамдани [8].

Пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора формируем с помощью иммунного регулятора. Схематично структура самонастраивающегося ПИД-регулятора представлена на рисунке 4, где $\hat{e}$ и $\hat{e}'$ – ошибка управления и скорость нарастания ошибки соответственно [10].

Иммунный регулятор

Работа иммунного регулятора основана на процессах, протекающих в живых организмах. Искусственная иммунная система представляет собой интеллектуальную систему, разработанную на основе принципов и механизмов биологической иммунной системы, что способствует повышению надежности и способности адаптироваться в условиях с большим количеством возмущающих воздействий и неопределенностей.

Эволюционные алгоритмы (ЭА) являются стохастическими методами оптимизации на основе естественной эволюции и наиболее приспособленных стратегий работы биологических организмов. Основной задачей иммунной системы является защита организма от патогенных микроорганизмов.

Биологическая иммунная система является механизмом, который перехватывает и устраняет экзогенные инфекционные микроорганизмы (антигены); такая иммунная система в основном состоит из клеток лимфоцитов и молекул антител. Существуют два вида клеток лимфоцитов [5]: T -клетки [делятся на клетки-помощники T_h (хелперы) и подавляющие клетки T_s (супрессоры)] и B -клетки. Механизм действует следующим образом: во время проникновения в организм антигенов, информация об этом воспринимается T_h клетками, которые в свою очередь стимулируют B -клетки, чтобы они вырабатывали антитела для устранения антигенов; количество T_h клеток продолжает расти, пока увеличивается число антигенов. Когда количество антигенов уменьшится, T_s клетки начинают устранять T_h клетки и в то же время B -клетки до полного устранения всех антигенов (а также других клеток), что приводит к нормальному состоянию иммунной системы.

Механизм иммунной системы явно действует подобно системам управления с обратной связью. Рисунок 2 описывает иммунные процессы, протекающие в иммунной системе.

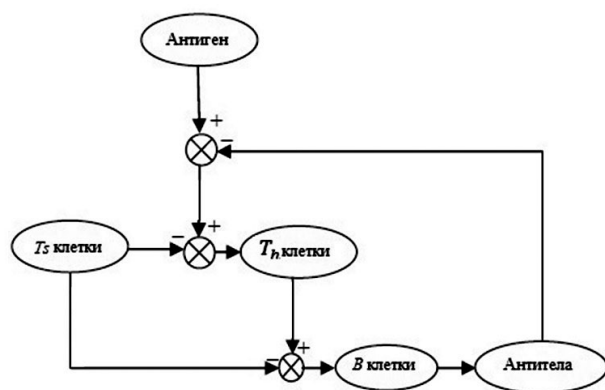


Рисунок 2 – Схема иммунных процессов в иммунной системе

После проникновения антигена в организм их консистенция становится высокой, а консистенция антител – минимальной. В последующей стадии иммунного процесса концентрация антигенов остается высокой, но консистенция антител увеличивается до небольшой величины за счет влияния консистенции T_h -клеток. Затем консистенция антигенов становится низкой, а консистенция антител возрастает до высокого значения, и начинает действовать механизм обратной связи (механизм подавления) [6].

Существуют различные модели иммунных систем, которые исследуют иммунные механизмы и роль клеток в иммунных процессах. В настоящее время для практических приложений применяются дискретные математические модели биологической иммунной системы [1], которые конструируют, исходя из представления о дискретности всех процессов, происходящих в этих системах. За последние годы достаточно большое распространение получили иммунные регуляторы дискретного действия [2, 6], базирующиеся на дискретных моделях биологической иммунной системы, со всеми вытекающими позитивными и негативными последствиями.

Но все процессы в человеческом организме являются непрерывными процессами, и с этой точки зрения ограничивать технические приложения искусственных иммунных процессов только путем использования цифровых регуляторов нецелесообразно.

В данной работе рассматривается методика построения иммунного регулятора непрерывного действия [2, 7, 11], инициированная гипотезой о непрерывности иммунных процессов, имеющих место в организме человека. Закон управления подобного регулятора, называемого в дальнейшем –непрерывный пропорциональный иммунный регулятор (НИМПР), определяется следующими выражениями:

$$u(t) = k_{p1} (du / dt) e(t), \quad (2)$$

$$k_{p1} (du / dt) = K[1 - \eta f(du / dt)], \quad (3)$$

$$e(t) = y(t) - v(t). \quad (4)$$

Здесь $e(t)$, означающее количество антигенов, проникших в организм в момент времени t , заменяется на $e(t)$ – ошибку регулирования, K – коэффициент усиления регулятора нелинейного иммунного регулятора; η – постоянная, определяющая устойчивость процессов иммунного регулирования. Нелинейная функция $f(du / dt)$ имеет вид [6]:

$$f\left(\frac{du}{dt}\right) = 1 - \frac{2}{1 + \exp\left(-\frac{\tau du}{dt}\right)} = 1 - \frac{2}{1 + \exp(-cx)}, c > 0, \quad (5)$$

где $-1 < f(du / dt) < 1$, параметр c определяет область действия переменной x .

Такой закон управления гарантирует устойчивость замкнутой системы с непрерывным объектом управления [1, 2, 6]. Однако при этом появляется установившаяся ошибка слежения при постоянном задающем воздействии. С целью обеспечить робастность системы управления, модифицируем нелинейный иммунный регулятор путем введения в закон управления прямой связи по задающему воздействию. Тогда видоизмененный закон управления принимает вид:

$$u(t) = k_{p1} (du / dt) e(t) + \alpha v(t). \quad (6)$$

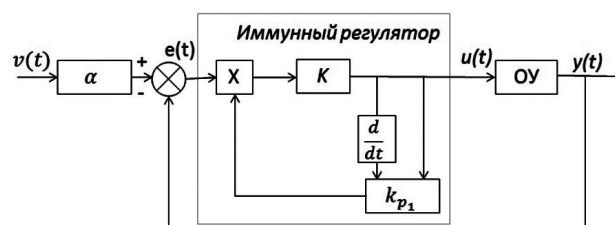


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления с модифицированным НИМПР

За счет выбора коэффициента α можно добиться безошибочного воспроизведения постоянного задающего воздействия $v(t) = v_0 = \text{const}$ при ограниченном произвольном значении v_0 .

Использование иммунного регулятора позволяет добиться безошибочного воспроизведения постоянного задающего воздействия. Однако спроектированный регулятор чувствителен к изменению свойств объекта в низкочастотной области, прежде всего к изменению коэффициента усиления объекта управления. К тому же он плохо ослабляет влияние на управляемую величину внешних возмущающих воздействий, так как по своей природе является безынерционным регулятором. В связи с этими

недостатками добавим в контур управления ПИД-регулятор и в дальнейшем будем использовать комбинированный закон управления, который позволяет объединить положительные свойства одного и другого регуляторов.

Непрерывный иммунный самонастраивающийся ПИД-регулятор

Непрерывный иммунный самонастраивающийся регулятор (рисунок 4) объединяет в себе все достоинства включенных в него регуляторов и не имеет недостатков, характерных для каждого из этих регуляторов в отдельности.

Он является самонастраивающимся за счет нечеткого регулятора. Такой регулятор применим при наличии задержек в системе и при изменяющихся параметрах ОУ.

Однако с целью повышения робастности системы к неопределенности модели объекта, учитываемой как действие неизмеряемого возмущения, и к шуму измерения в обратную связь вводится фильтр (рисунок 4). Если ошибки моделирования большие, то система может стать неустойчивой. При этом за счет фильтра можно избежать неустойчивой работы. Также необходимо учесть влияние возмущающего воздействия d подобно тому, что изображено на рисунке 4.

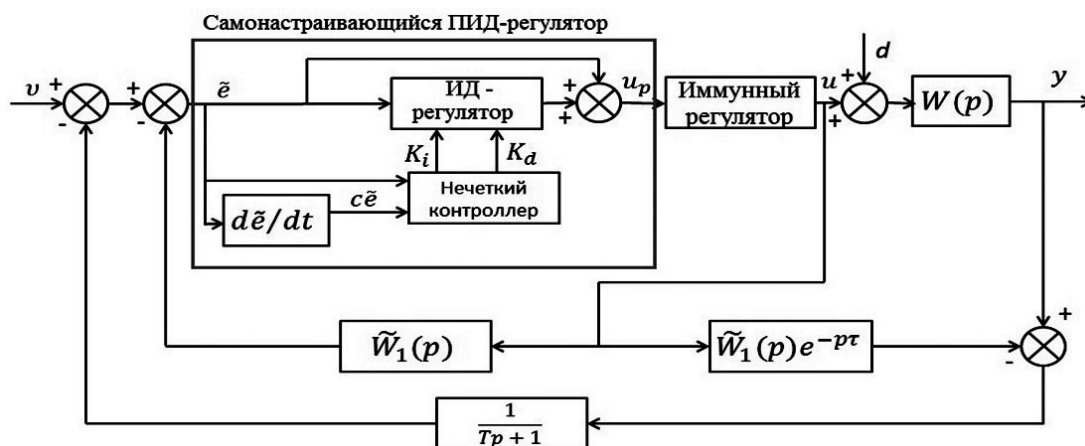


Рисунок 4 – Структура непрерывного иммунного самонастраивающегося ПИД-регулятора

Воспользуемся описанным выше управляющим устройством в совокупности с предиктором Смита для объекта управления из трех связанных баков, показанных ниже.

Экспериментальные исследования

В качестве объекта управления рассматривается система, состоящая из трех баков с жидкостью, последовательно соединенных неинерционной связью, как на рисунке 5.

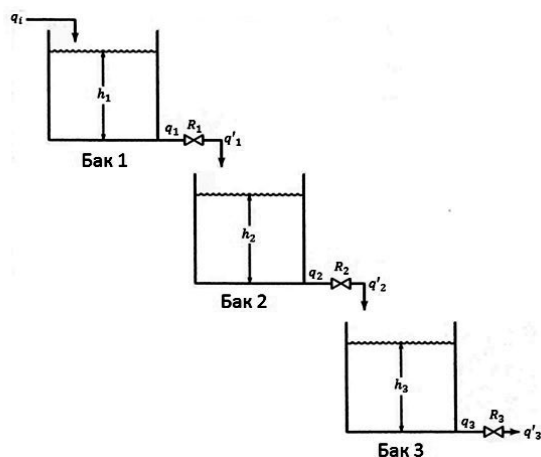


Рисунок 5 – Модель объекта управления из трех каскадно-соединенных баков с жидкостью

Здесь h_i [м] – высота уровня жидкости в каждом цилиндрическом баке, $i = \overline{1,3}$, q_i [м³/с] – поток жидкости, втекающий в первый бак; q_1, q_2, q_3 [м³/с] – вытекающая жидкость соответственно из первого, второго и третьего баков; R_1, R_2, R_3 [с/м²] – линейные сопротивления баков, 1, 2 и 3 соответственно, вызванные трением о стенки бака. Транспортное запаздывание $\tau = 1$ [с] обусловлено большой длиной трубопроводов, по которым перетекает жидкость.

Передаточная функция объекта управления [14] описывается выражением:

$$W(p) = \frac{2e^{-p}}{(3p+1)(3p+1)(3p+1)}. \quad (7)$$

На основе описанных методов была разработана система комбинированного самонастраивающегося ПИД-регулятора и непрерывного иммунного ПИД-регулятора. Коэффициенты ПИД-регулятора, найденные по методу Циглера-Николса: $K_i = 0,533, K_d = 5, K_p = 2,4$. У самонастраивающегося ПИД-регулятора на входе две лингвистические переменные (ошибка и скорость нарастания ошибки) и интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления ПИД-регулятора с семью термами на выходе.

Всего формулируется 49 нечетких правил. В качестве функции принадлежности (ФП) выбрали пять треугольных ФП, одну сигмоидальную s -образную и одну сигмоидальную z -образную ФП. Для дефазификации воспользуемся методом центра тяжести.

Моделирование было осуществлено в пакете Matlab/Simulink [9]. На рисунке 6 представлена реакция системы при единичном ступенчатом сигнале, равном единице, на входе и возмущающем воздействии $d(t)=0.1*(t-45)$, приложенном к входу объекта в момент времени $t=45$.

Система показывает достаточно высокую эффективность управления, практически отсутствует перерегулирование, достаточно быстро устраняется постоянное возмущающее воздействие, запаздывание объекта влияет только на скорость реакции системы, но не влияет на управление, скорость нарастания системы также достаточно высока.

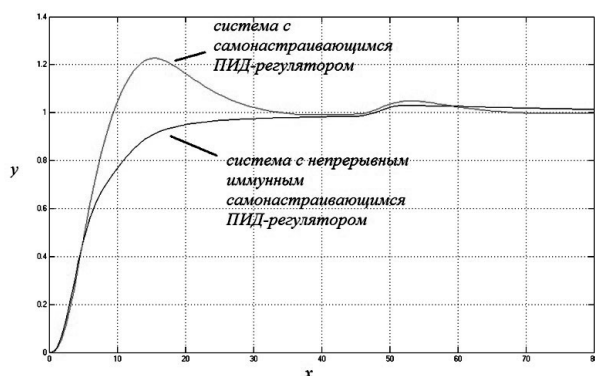


Рисунок 6– Реакция системы при единичном входном сигнале и постоянном возмущающем воздействии $d(t)=0.1*(t-45)$, приложенном к входу объекта в момент времени $t=45$

Характеристики полученной системы представлены в таблице.

Сравнительные характеристики результатов работы разработанной системы и непрерывной системы с самонастраивающимся ПИД-регулятором

Оцениваемые характеристики	Непрерывная система с самонастраивающимся ПИД и иммунным регуляторами	Непрерывная система с самонастраивающимся ПИД-регулятором
Время нарастания	14 с	35 с
Влияние возмущающих воздействий	3 %	6,5 %
Перерегулирование	0 %	23 %

Симуляция непрерывной системы с самонастраивающимся ПИД и иммунным регуляторами показала, что предложенная методика построе-

ния непрерывного иммунного регулятора достаточно эффективна, а применение самонастраивающегося нечеткого ПИД-регулятора позволяет заметно улучшить качество системы, при этом избежав сложностей в реализации. Использование предиктора Смита уменьшает влияние запаздывания на управляющее устройство, что помогает избежать многих трудностей моделирования. ПИД-регулирование помогает эффективно подавлять внешние возмущения, влияющие на ОУ. Кроме того, добились робастности по отношению к изменению параметров ОУ, влияющих на знаменатель ПФ ОУ, и робастности по отношению к коэффициенту усиления ПФ ОУ. Проведенные опыты показали, что достигается лучшее качество переходного процесса, а именно: время регулирования сокращается, не возникает перерегулирование, возмущения подавляются относительно быстро.

Заключение

В данной статье рассмотрена система управления объектом с запаздыванием с помощью комбинации непрерывного иммунного и автоматически настраиваемого ПИД-регуляторов. Показана эффективность применения предложенных методов.

Одним из важнейших нововведений является то, что была получена непрерывная модель иммунного регулятора, поэтому его встраивание в какую-либо систему управления не повлечет за собой трудностей, связанных с использованием дискретных регуляторов.

Библиографический список

1. **Попова А. А.** Непрерывный иммунный регулятор / А. А. Попова // Математика и информационные технологии в приложениях: материалы Международного студенческого симпозиума. СГУ-2015. – Сочи, 2015. – С. 103-105.
2. **Попова А. А.** Непрерывная модель биологической иммунной системы / А. А. Попова // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – БИОМЕДСИСТЕМЫ: сб. тр. XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. РГРТУ – 2014. – Рязань, 2014. – С. 110-112.
3. **Takahashi K, Yamada T.** Application of an immune feedback mechanism to control systems. JSME IntJ, pp: 184-191, 1998.
4. **Zhang H., Li Zh.** Fuzzy immune control based Smith predictor for networked control systems. LACSIT International journal of engineering and technology, vol., no. 1, 2011, pp. – 1-5.
5. **Gherbi S., Bouchared F.** Optimal Tuning of a Fuzzy Immune PID parameters to control a delayed system. Word academy of science, engineering and technology international journal of electrical, electronics and communications engineering. Vol. 8, no. 6. 2014, pp. 44-48.

6. **Dipankar Dasgupta**. Immunological Computation. Theory and Applications / DipankarDasgupta, Luis Fernando Nino. – London: Taylor & Francis Group, 2009. pp – 279.

7. **Sharad Kumar Tiwari**. Analysis of Fuzzy PID and Immune PID Controller for Three Tank Liquid Level Control / Sharad Kumar Tiwari, Gagandeep Kaur // JSMEInternational Journal – September 2011. - Vol 1, Issue-4. – pp. 185-189.

8. **Ghoreishi A. S., Mohammad A. and Basiri O. S.** Optimal Design of LQR Weighting Matrices based on Intelligent Optimization Methods, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 2011, pp. 1-9.

9. **Леоненков А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 719 с.

10. **Усков А. А.** Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография / А. А. Усков. – Смоленск.: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ «Российский университет кооперации», 2013. – 153 с.:

11. **Бобиков А. И., Бубнова Т. С.** Непрерывный иммунный ПИД-регулятор, Материалы докладов XXVIII всероссийской научной конференции БИОМЕДСИСТЕМЫ – 2015, Рязань, 2015.

12. **Бобиков А. И.** Интеллектуальные системы управления (проектирование нечетких ПИД-регуляторов и нечетких обратных связей нейронной сети), РГРТУ. Рязань, 2008. – 64с.

13. **Sourdille P., O'Dwyer, A.** «An outline and further development of Smith predictor based methods for the compensation of processes with time delay». In Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference. 2003, pp-83.

14. **Jianqiu Deng**. «The Smith-PID Control of Three-Tank-System Based on Fuzzy Theory». Journal of computers, vol. 6, no. 3, march 2011.

15. **Brian R Copeland**. The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning / Brian R Copeland / March 2008.

16. **Karthik A., Supriyanka J.** Design of Self-tuning PID controller using Fuzzy logic for level process / June, 2014.

UDC 681.515

CONTINUOUS IMMUNE SELF-ADJUSTING PID-CONTROLLER OF AN OBJECT WITH DELAY

A. I. Bobikov, PhD (technical sciences), RSREU, Ryazan; tanya.bubnova.94@mail.ru

T. S. Bubnova, software engineer, LLC IC «Unified information standart», RSREU, tanya.bubnova.94@mail.ru

A. A. Popova, font-end developer, «Index Studio»; tanya.bubnova.94@mail.ru

*One of the most important tasks of management theory is the development of effective control methods. In this article, in order to enhance the quality of the object control system with delay we propose to use a combination of traditional PID controller and immune controller, which makes it possible to increase speed control. This method of control is associated with the replacement of conventional PID controller into self-adjusting indecipherable PID controller. The proposed method integrates the advantages of self-adjusting and immune controllers. The effect of object delay decreases by applying a modified Smith's predictor. **The aim** is to develop and study the control system with continuous immune self-tuning PID controller that has greater speed and being less sensitive to the influence of disturbances in comparison with control system with self-tuning PID controller.*

Key words: continuous systems, objects with delay, Smith's predictor, immune controllers, PID-controller.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-145-151

References

1. **Popova A. A.** Continuous immune regulator/ A. A. Popova .Mathematics and information technology applications in: Proceedings of the International Student Symposium. SGU-2015. Sochi, 2015. pp. 103-105 (in Russian).

2. **Popova A. A.** Continuous model of biological immune system /A. A. Popova. Biotechnical, medical and environmental systems and complexes – BIOMED-SISTEMY: sb. tr. XXVII all-Russia scientific-technical conference of students of RGRU, 2014. Ryazan, 2014. pp. 110-112 (in Russian).

3. **Takahashi K, Yamada T.** Application of an immune feedback mechanism to control systems. JSME IntJ, pp: 184-191, 1998 (in Russian).

4. **Zhang H., Li Zh.** Fuzzy immune control based Smith predictor for networked control systems. LACSIT International journal of engineering and technology, vol., no. 1, 2011, pp. 1-5 (in Russian).

5. **Gherbi S., Bouchared F.** Optimal Tuning of a Fuzzy Immune PID parameters to control a delayed system. Word academy of science, engineering and technology international journal of electrical, electronics and

communications engi-neering. Vol 8, no 6. 2014, pp 44-48. (in Russian).

6. **Dipankar Dasgupta**. Immunological Computation. Theory and Applications. – London: Taylor & Francis Group, 2009. p. 279 (in Russian).

7. **Sharad Kumar Tiwari**. Analysis of Fuzzy PID and Immune PID Controller for Three Tank Liquid Level Control / JSME International Journal – September 2011. - Vol 1, Issue-4. pp. 185-189 (in Russian).

8. **Ghoreishi A. S., Mohammad A. and Basiri O. S.** Optimal Design of LQR Weighting Matrices based on Intelligent Optimization Methods, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 2011, pp. 1-9 (in Russian).

9. **Leonenkov A. V.** Fuzzy modeling in MATLAB environment and FuzzyTECH / A. V. Leonenkov. SPb.: BHV-Peterburg, 2003. p. 719. (in Russian).

10. **Uskov A. A.** With fuzzy models of control objects Systems: Monograph / A. A. Uskov. Smolensk.: Smolensk branch ANO VPO CS RF «Rossijskij universitet kooperacii», 2013. p. 153 (in Russian).

11. **Bobikov A.I., Bubnova T.S.** Continuous immune PID controller, Proceedings of the All-Russia Scientific Conference XXVIII BIOMEDSISTEMY 2015, Rjazan', 2015 (in Russian).

12. **Bobikov A. I.** Intelligent control systems (designing of fuzzy PID controller and fuzzy feedback neural network), RGRTU. Ryazan 2008.p. 64 (in Russian).

13. **Sourdille P., O'Dwyer A.**, «An outline and further development of Smith predictor based methods for the compensation of processes with time delay». In Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference. 2003, p. 83 (in Russian).

14. **Jianqiu Deng**, «The Smith-PID Control of Three-Tank-System Based on Fuzzy Theory». Journal of computers, vol. 6, no. 3, march 2011 (in Russian).

15. **Brian R Copeland**. The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning / Brian R Copeland. March 2008 (in Russian).

16. **Karthik A., Supriyanka J.** Design of Self-tuning PID controller using Fuzzy logic for level process. June, 2014 (in Russian).