

УДК 681.515

УПРАВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫМИ ОБЪЕКТАМИ И ОБЪЕКТАМИ С ИНТЕГРАТОРОМ ПРИ ПОМОЩИ НЕПРЕРЫВНОГО ИММУННОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

А. И. Бобиков, к.т.н., доцент кафедры АИТУ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-7440-3118, e-mail tanya.bubnova.94@mail.ru;

Т. С. Бубнова, аспирант кафедры АИТУ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7085-0591, e-mail: tanya.bubnova.94@mail.ru;

Представлен алгоритм управления неустойчивыми объектами и объектами с интегратором, обладающими запаздыванием, с использованием иммунного и ПИД-регуляторов совместно с предиктором Смита. Целью работы является повышение быстродействия системы управления, уменьшение величины перерегулирования, а также снижение влияния возмущающих воздействий в сравнении с результатами работы системы без иммунного регулятора. К тому же рассмотрена задача обеспечения устойчивости типа вход-выход системы с помощью теорем о малом и большом коэффициентах усиления. Полученные результаты моделирования, осуществленные в пакете Matlab/Simulink, наглядно показывают эффективность разработанной методики проектирования.

Ключевые слова: объект с запаздыванием, объект с интегратором, неустойчивый объект, предиктор Смита, непрерывный иммунный регулятор, L_2 -устойчивость, теорема о малом коэффициенте усиления, теорема о большом коэффициенте усиления, ПИД-регулятор.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-116-128

Введение

На сегодняшний день существует большое количество работ с использованием гибких биоинспирированных регуляторов в системах автоматического управления, что связано с высокой эффективностью таких подходов. Наиболее яркими примерами являются системы, в основе которых лежит нейросеть [1], а также генетические [2] и стайные алгоритмы.

В последние годы было разработано немало систем автоматического управления, где в качестве управляющего устройства использовался иммунный регулятор [5]. Однако во всех работах рассматриваются системы управления с цифровым регулятором, что может вызвать необходимость добавления ЦАП и АЦП, особенно в случае комбинирования иммунного и непрерывного пропорционально-интегрально-дифференцирующего регуляторов (ПИД-регуляторов). Поэтому в данной работе предложено использовать непрерывный иммунный регулятор, представленный в работах [4, 11].

Стоит отметить, что большинство работ, посвященных повышению качества управления, рассматривает устойчивые объекты управления (ОУ), при этом управление неустойчивыми ОУ и ОУ с интегратором оказывается менее изученным. Так, в работах [5-7] рассмотрены различные варианты управления неустойчивыми объектами и объектами с интегратором с помощью пропорционально-интегрального (ПИ) и ПИД-регулирования. Но при использовании аналогичных неустойчивых объектов с длительным запаздыванием реакция системы управления резко ухудшается [8]. С целью повышения качества управления объектом с длительным запаздыванием в работах [8, 9] предложено использовать предиктор Смита (ПС), который позволяет не учитывать влияние запаздывания при расчете управляющего устройства.

Классический ПС не может быть использован с неустойчивыми или содержащими интеграторы ОУ, так как в традиционной форме он обеспечивает устойчивость замкнутой системы и не устраняет влияния ступенчатых возмущений. Эти два недостатка будут обсуждены в этой статье, и будут проанализированы некоторые методы выбора параметров.

Однако, как показано в работе [10], неустойчивые объекты и объекты с интегратором теряют устойчивость при увеличении запаздывания в допустимых диапазонах, а также чувствительны к влиянию постоянных возмущающих воздействий.

Поэтому в данной работе для управления неустойчивыми объектами и объектами с интегратором предложено использовать комбинацию непрерывного иммунного, ПИД-регуляторов и предиктора Смита. Основной целью является обеспечение устойчивости системы при изменении времени запаздывания в допустимых диапазонах, а также уменьшение влияния постоянного возмущающего воздействия при различных значениях, сокращение времени перерегулирования и времени нарастания. К тому же важным условием является обеспечение робастности системы относительно изменения уровня постоянного входного сигнала и неточности моделирования объекта управления.

Предиктор Смита

Предиктор Смита – это простой метод управления, используемый в системах с запаздыванием. Система управления с предиктором Смита включает в себя передаточную функцию (ПФ) $W(p)$ объекта управления, которую можно представить в виде $W(p) = W_1(p)e^{-p\tau}$, τ – предполагаемое время запаздывания, $W_1(p)$ – ПФ модели ОУ.

Как правило, в качестве объекта управления используется ПИД-регулятор, который не всегда может обеспечить устойчивость системы управления при высоком запаздывании. В случае, когда время запаздывания известно не точно, расчет параметров ПИД-регулятора усложняется, не всегда получается обеспечить устойчивость системы в допустимом диапазоне изменения значения запаздывания. Использование комбинации ПИД-регулятора и предиктора Смита помогает обеспечить устойчивость системы с большим временем запаздывания.

Таким образом, система с предиктором Смита позволяет преодолеть сложности, связанные с неопределенным временем запаздывания, а также использование ПИД-регулятора способствует обеспечению устойчивости неустойчивых объектов и объектов с интегратором.

ПИД-регулятор

Наиболее часто в системах автоматического управления используют ПИД-регулятор, что связано с его высокой эффективностью. Закон управления ПИД-регулятора $u_{pid}(t)$ можно представить в следующем виде:

$$u_{pid}(t) = h(e(t)) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}, \quad (1)$$

где $e(t) = v(t) - y(t)$ есть ошибка между задающим воздействием $v(t)$ и управляемой величиной $y(t)$; K_p , K_i и K_d представляют собой пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты ПИД-регулятора соответственно. Обычно настройку ПИД-регулятора осуществляют по методу Циглера – Николса. Такой подход позволяет добиться устойчивости системы управления в отсутствие иммунного регулятора.

Комбинация непрерывных иммунного и ПИД-регуляторов

Система управления с ПИД-регулятором и предиктором Смита позволяет обеспечить устойчивость системы с неустойчивыми объектами и объектами с интегратором. Однако наличие возмущающих воздействий и влияние запаздывания крайне негативно сказывается на результатах управления, в некоторых случаях приводя к неустойчивости замкнутой системы. С целью обеспечить устойчивость и, кроме того, улучшить реакцию системы при изменении запаздывания включим в систему непрерывный иммунный регулятор, объединив при этом достоинство каждого из регуляторов.

Само понятие иммунного регулятора для систем автоматического управления было введено японскими учеными Такахаши и Ямада в [12], где они описали основные принципы работы дискретного иммунного регулятора, а также показали его эффективность. В основе работы такого регулятора лежит алгоритм функционирования иммунной системы человека.

В данной работе используется непрерывный вариант иммунного регулятора, предложенный в работах [4, 11]. При этом выходной сигнал $u_{im}(t)$ иммунного регулятора [11] будет иметь вид:

$$u_{im}(t) = K[1 - \eta f(u_s(t))]u_{pid}(t) = Kf_s(u_s(t))u_{pid}(t), \quad (2)$$

где иммунная моделирующая функция

$$f(u_s(t)) = \frac{\exp(-cu_s(t)) - 1}{\exp(-cu_s(t)) + 1}, \tau > 0 \quad (3)$$

есть нелинейная функция, лежащая в диапазоне $[-1; 1]$, а K, η и c – параметры непрерывного иммунного регулятора. При этом множитель $f_s(u_s(t)) = 1 - \eta f(u_s(t))$. В системах управления с иммунной обратной связью K и η являются особенно важными параметрами. Увеличение значения K способствует повышению скорости реакции (быстродействия) системы, а изменение значения η позволяет уменьшить колебательность системы и тем самым снизить переупреждение.

Закон управления непрерывного иммунного ПИД-регулятора можно представить в виде суммы законов управления этих двух управляющих устройств: $u(t) = u_{im}(t) + u_{pid}(t)$. Путем подстановки из выражений (1) и (2) выходной сигнал иммунного ПИД-регулятора можно записать, полагая $u_{pid}(t) = h(e(t))$, в виде:

$$u(t) = u_{im}(t) + u_{pid}(t) = h(e(t)) + Kf_s(u_s(t))h(e(t))$$

Откуда можно получить закон управления иммунного ПИД-регулятора в общем виде:

$$u(t) = [1 + Kf_s(u_s(t))]h(e(t)). \quad (4)$$

Функцию $u_s(t)$ можно выбрать различным образом [11, 12, 14]. Здесь используем $u_s(t) = 1 - \exp(-Tu(t))$ из работы [11]. При этом получаем еще один параметр проектирования T .

Предлагаемая комбинация иммунного и ПИД-регулятора позволяет значительно уменьшить влияние возмущающих воздействий в сравнении с использованием классического ПИД-регулятора, при этом обеспечивается робастность системы к изменениям параметров ОУ в допустимом диапазоне.

Модель замкнутой системы управления с непрерывным иммунным ПИД-регулятором и предиктором Смита представлена на рисунке 1, где d – возмущающее воздействие, v – задающее воздействие.

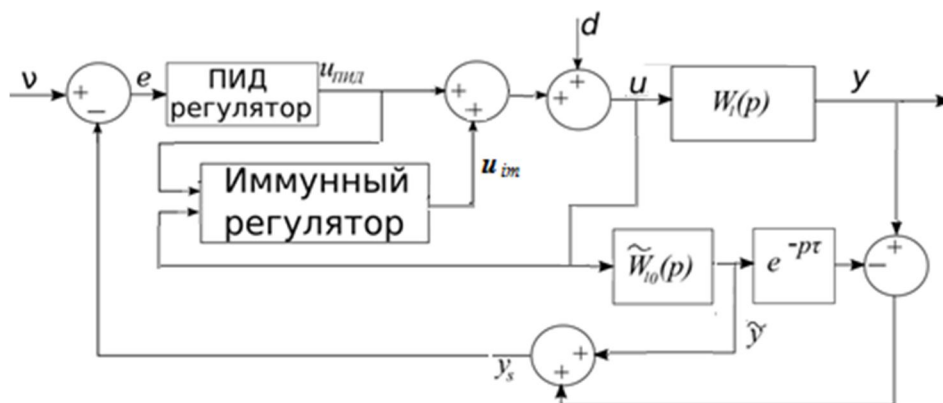


Рисунок 1 – Структурная схема замкнутой системы управления с непрерывным иммунным ПИД-регулятором и предиктором Смита

Figure 1 – Block diagram of a control system with a continuous immune PID controller and Smith predictor

L_2 устойчивость замкнутой системы

«Мягкое» определение L_2 устойчивости [18] состоит в том, что оператор S является L_2 устойчивым, если он преобразует L_2 входной сигнал $f(t)$ в L_2 выходной сигнал $S[f(t)]$. Более строгое определение связано с понятием L_2 коэффициента усиления [8].

Определение (L_2 устойчивость). Система с оператором S называется L_2 устойчивой с конечным L_2 коэффициентом усиления, если существуют постоянные α и β такие, что

$$\|S[f(t)]\| < \alpha\|f(t)\| + \beta.$$

С целью исследования L_2 устойчивости замкнутой системы управления (рисунок 1) рассмотрим случай применения пропорционального регулятора (П-регулятора), когда

$$h(e(t)) = K_p e(t).$$

При этом закон управления (4) можно записать как

$$u(t) = k_1 e(t) + k_2 f(u_s(t))e(t), \quad (5)$$

где $k_1 = K_p$, $k_2 = K_p K$.

Теорема 1. Иммуный П-регулятор является устойчивым с точки зрения «ограниченный вход-ограниченный выход» (L_2 устойчивым).

Принимая во внимание (3), где $(f(u_s(t))) \leq (1 + \eta)|k_2|$, выражение (4) можно представить в виде:

$$\|u(t)\| \leq k_1 \|e(t)\| + (1 + \eta)|k_2|. \quad (6)$$

Согласно определению L_2 устойчивости иммунный П-регулятор является устойчивым и его индуцированный коэффициент усиления определяется как

$$\gamma_2 = \sup_{e \in L_2} \frac{\|u(t)\|}{\|e(t)\|} = |k_1|.$$

Для исследования L_2 устойчивости замкнутой системы управления на рисунке 1 рассмотрим два случая. В первую очередь стоит обратить внимание, что в системе с предиктором Смита при идеальном совпадении объекта и его модели можно не учитывать влияния запаздывания на устойчивость системы. Поэтому можно положить $W(p) = W_1(p)$.

1 случай. Все полюса передаточной функции объекта $W(p)$ имеют отрицательную вещественную часть. Тогда применима теорема о малом коэффициенте усиления [8], в соответствии с которой замкнутая система, представляющая последовательное соединение двух подсистем, охваченных обратной связью, является устойчивой с точки зрения «ограниченный вход-выход», если произведение индуцированных коэффициентов усиления подсистем меньше единицы.

Теорема 2. Если все полюса передаточной функции объекта $W(p)$ имеют отрицательную вещественную часть и индуцированный коэффициент усиления объекта, соответствующий $W(p)$, равен

$$\gamma_1 = \sup_{u \in L_2} \frac{\|y(t)\|}{\|u(t)\|} = |k_w|$$

и если $|k_1| |k_w| < 1$, то отсюда следует, что система управления с П-иммунным регулятором является устойчивой с точки зрения «ограниченный вход-ограниченный выход».

2 случай. Не все полюса передаточной функции объекта $W(p)$ имеют отрицательную вещественную часть, т.е. объект управления является неустойчивым. Тогда применима теорема о большом коэффициенте усиления, которая применима, когда объект и регулятор или оба элемента неустойчивы. Эта теорема отличается от теоремы о малом усилении, которая требует, чтобы регулятор и объект были устойчивыми. Однако, когда объект и регулятор являются линейными стационарными системами, теорема о большом коэффициенте усиления требует, чтобы они оба были минимально фазовыми. Кстати, теорема о малом коэффициенте усиления не требует, чтобы объект и регулятор были с минимальной фазой. Теорема о большом коэффициенте усиления [13, 16] гласит: рассмотрим последовательное соединение двух подсистем с передаточными функциями $W_1(p)$ и $W_2(p)$, охваченных обратной связью.

Если эти подсистемы имеют минимальные коэффициенты усиления $k_{W_1} = \nu_1 = \frac{1}{\gamma_1(W_1^{-1})}$ и $k_{W_2} = \nu_2 = \frac{1}{\gamma_2(W_2^{-1})}$ соответственно и удовлетворяется условие $1 < \nu_1 \nu_2 < \infty$, тогда замкнутая система является L_2 устойчивой. Здесь максимальный L_2 коэффициент усиления обратной передаточной функции W^{-1} определяется с помощью выражения

$$\gamma(W^{-1}) = \sup_{\substack{u \in U \\ \|u\|}} \frac{\|W^{-1}u\|}{\|u\|}.$$

Теорема 3. Если не все полюса передаточной функции объекта $W(p)$ имеют отрицательную вещественную часть и минимальный коэффициент усиления объекта соответствующий $W(p)$, равен $k_{W_1} = \nu_1 = \frac{1}{\gamma_1(W_1^{-1})}$ и если $1 < \nu_1 \nu_2 < \infty$, то отсюда следует, что система управления с П-иммунным регулятором и неустойчивым объектом управления является L_2 устойчивой с точки зрения «ограниченный вход-ограниченный выход».

Доказательство. Так как минимальный коэффициент усиления П-иммунного регулятора определяется как $\nu_2 = \frac{1}{\gamma_2(W_2^{-1})} = \frac{1}{1/|k_1|} = |k_1|$, то теорема 2 доказана.

Пример. Пусть передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p) = \frac{k_W(p+1)}{p-1}.$$

Согласно [13, 16] $\nu_1 = \frac{1}{\gamma_1(W_1^{-1})} = |k_W|$. Следовательно, $\nu_1 \nu_2 = |k_W| |k_1|$. Теорема о большом коэффициенте усиления, а именно теорема 3, гарантирует, что замкнутая система является L_2 устойчивой, если $\infty > |k_W| > 1$.

Отметим, что условие устойчивости, полученное из теорем о малом и большом коэффициентах усиления, является достаточным. Тем не менее, теоремы 2 и 3 являются важным ориентиром для выбора параметров иммунного регулятора.

Серьезным требованием, предъявляемым к системам управления, в частности, к рассматриваемым в этой работе, является робастность к изменению параметров объекта управления, прежде всего, к изменению времени запаздывания τ относительно номинального значения, используемого при построении регулятора. При этом обычно априорно удается определить диапазон возможных изменений этого параметра. К допустимым пределам относят принадлежащее вышеуказанному диапазону подмножество значений τ , при котором система управления сохраняет устойчивость и требуемое качество. Естественно, что допустимые пределы можно определить лишь применительно к каждому конкретному объекту управления. Как следует из приведенных далее примеров, иммунный ПИД-регулятор позволяет обеспечивать устойчивость и удерживать перерегулирование и длительность переходного процесса достаточно близкими к номинальным при относительно больших изменениях времени запаздывания. Кроме того, при этом реакция на возмущение также не претерпевает заметных отклонений.

Экспериментальные исследования

В качестве примеров рассмотрим объекты управления, фигурирующие в работах [6, 7, 10, 15, 17]. Моделирование системы управления такими объектами осуществлено в пакете Matlab/Simulink. Во всех примерах исследовано поведение системы управления для трех значений параметра K иммунного регулятора, равных 1, 3 и 5, при других значениях параметров иммунного регулятора: $\eta = 0,5$, $s = 7$, $T = 1$ с.

Пример 1. В первом случае рассмотрен объект управления с интегратором, передаточная функция которого имеет вид: $W(p) = \frac{e^{-p}}{p}$. Реакция системы на постоянное входное воздействие при единичном ступенчатом сигнале на входе и возмущающем воздействии $d(t) = 0,1 * 1(t - 40)$, приложенном к входу объекта в момент времени $t = 40$ с, представлена на рисунке 2. Параметры ПИ-регулятора были взяты из [10] и имеют следующие значе-

ния: $K_p = 0,5$, $K_i = 0,625$. На рисунке 2 пунктирной линией показана реакция системы с ПИ-регулятором, тонкой сплошной линией – иммунного ПИ-регулятора при $K = 1$, точками – при $K = 3$, толстой сплошной линией при $K = 5$. Во всех случаях для уменьшения влияния запаздывания на работу системы управления используется предиктор Смита.

Также проведено исследование системы на робастность по отношению к изменению времени запаздывания. На рисунке 3 представлена реакция системы, где время запаздывания модели объекта изменяется в пределах $\pm 20\%$, при этом параметр $K = 1$. В таблице 1 представлены сравнительные результаты работы системы. При этом видно, что добавление иммунного регулятора позволяет значительно улучшить реакцию системы управления на постоянное входное воздействие, а также снизить влияние возмущающего воздействия. Как видим, изменение коэффициента K иммунного регулятора влияет на качество системы управления, главным образом увеличивая ее быстродействие.

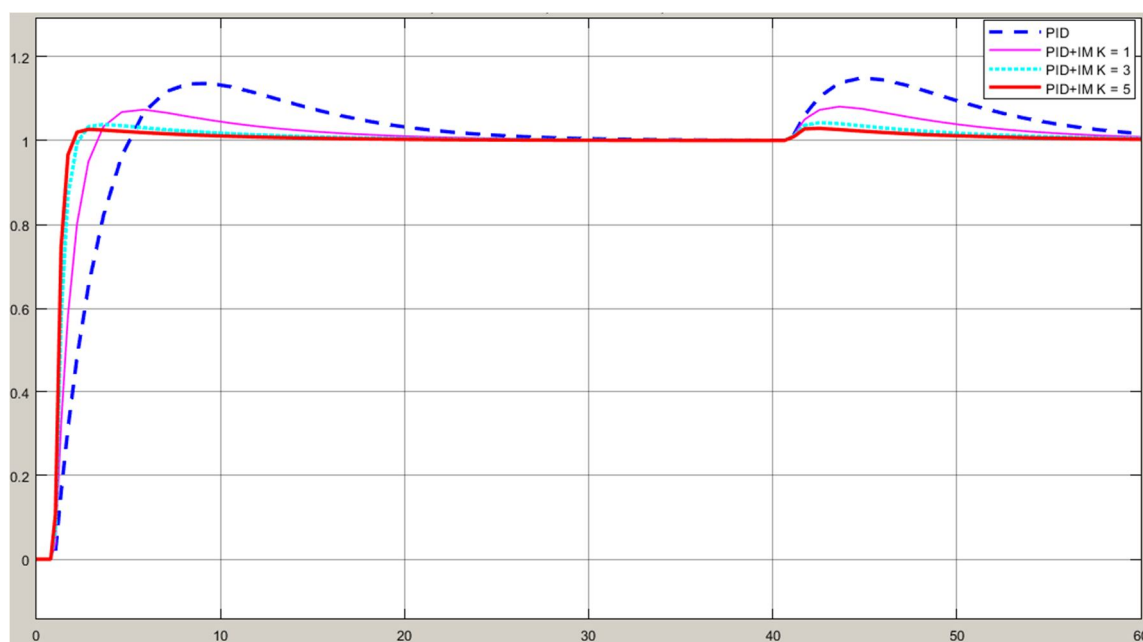


Рисунок 2 – Реакция системы с объектом с интегратором
Figure 2 – The response of a system having the object with integrator

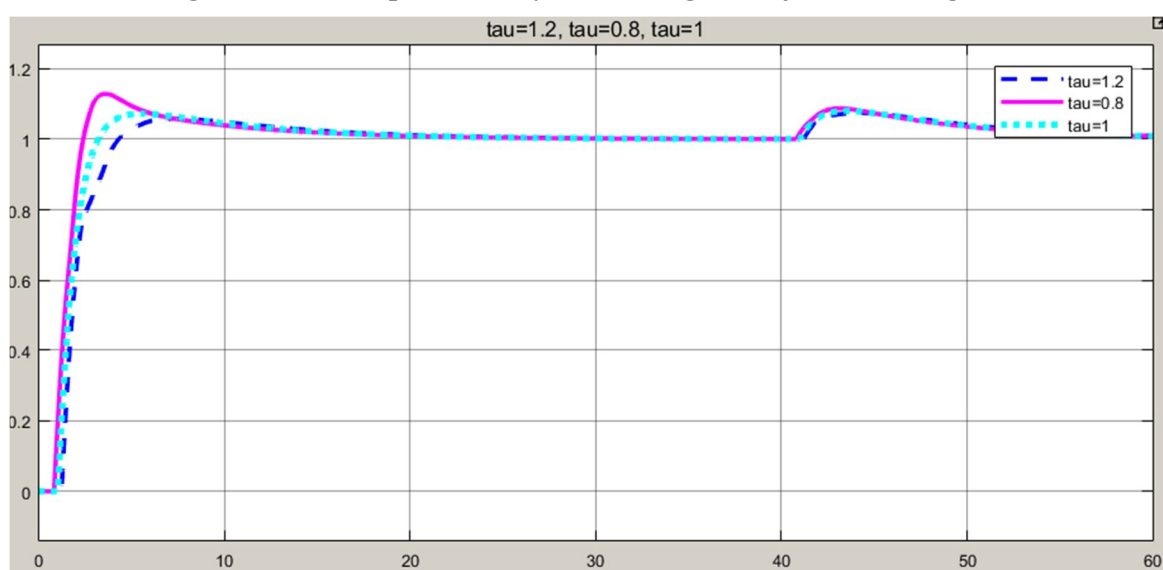


Рисунок 3 – Реакция системы с объектом с интегратором при изменении запаздывания
Figure 3 – The response of a system having the object with integrator when delay changes

Из анализа графиков, представленных на рисунке 3 можно сделать вывод, что при изменении времени запаздывания ОУ на $\pm 20\%$ система управления сохраняет устойчивость при небольшом ухудшении качества регулирования: перерегулирование увеличивается на 2% , максимальное значение реакции на возмущающее воздействие повышается на $0,2\%$ процента.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики систем управления

Table 1 – Comparative characteristics of control systems

Оцениваемые характеристики	Система с ПИ-регулятором, представленная в работе [10]	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 1$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 3$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 5$
Время нарастания	18 с	9 с	3 с	3 с
Влияние возмущающих воздействий	15 %	8 %	4 %	2,6 %
Перерегулирование	14 %	7,5 %	4 %	3 %

Пример 2. Неустойчивый ОУ с двумя правыми полюсами описывается ПФ [17]: $W(p) = \frac{(5p+1)e^{-1p}}{(10p-1)(5p-1)}$. На рисунке 4 представлена реакция системы на постоянное входное воздействие при единичном ступенчатом сигнале на входе и возмущающем воздействии $d(t) = 0,1 * 1(t - 30)$, приложенном к входу объекта в момент времени $t = 30$ с, для трех значений 1, 2 и 3 параметра иммунного регулятора K . Параметры ПИД-регулятора были взяты из [17] и имеют следующие значения: $K_p = 9,4143$, $K_i = 5,1169$, $K_d = 0,6084$. Сравнение показателей качества работы системы с ПИД-регулятором и систем с комбинацией иммунного и ПИД-регуляторов при различных значениях параметра K иммунного регулятора представлено в таблице 2, откуда можно сделать вывод о преимуществах предлагаемого закона управления.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики систем управления

Table 2 – Comparative characteristics of control systems

Оцениваемые характеристики	Система с ПИ-регулятором, представленная в работе [17]	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 1$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 3$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 5$
Время нарастания	16 с	8 с	4 с	4 с
Перерегулирование	52 %	27 %	15 %	10 %
Влияние возмущающих воздействий	8,5 %	3,5 %	1,7 %	1 %

Робастность системы управления к запаздыванию ОУ можно оценить, используя кривые, представленные на рисунке 5, которые отражают результаты моделирования системы при изменении времени запаздывания в диапазоне $\pm 10\%$. Параметр K иммунного регулятора равен 1. Из полученных результатов можно видеть, что изменение времени запаздывания в заданном диапазоне не сильно влияет на качество управления – перерегулирование изменяется на 7% , время регулирования и реакция на возмущающие воздействия остаются аналогичными идеальному случаю, когда время запаздывания объекта управления и модели равны.

Пример 3. В качестве третьего примера неустойчивого объекта управления рассмотрим объект описываемый ПФ вида: $W(p) = \frac{1.77(0.3186p+1)e^{-0.1p}}{(0.028p^3+1.324p^2-0.479p+1)}$.

Параметры ПИД-регулятора имеют следующие значения [17]: $K_p = 9,0913$, $K_i = 0,9668$, $K_d = 0,115$. Полученные реакции систем управления для данного ОУ представлены на рисунке 6, где видно, что иммунный регулятор позволяет не только улучшить переходный про-

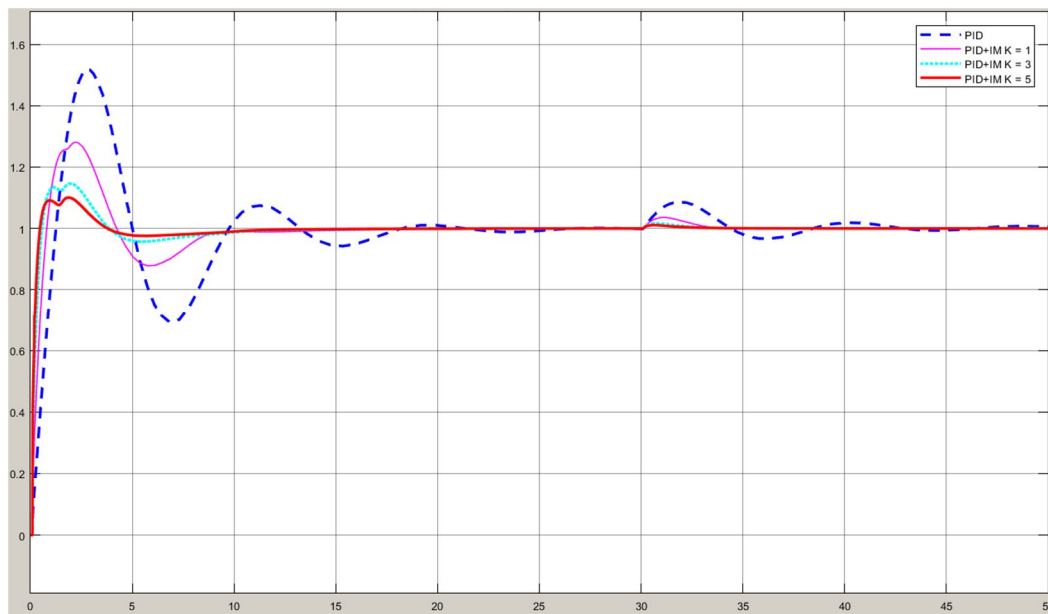


Рисунок 4 – Реакция системы с неустойчивым ОУ
Figure 4 – The response of a system with unstable object

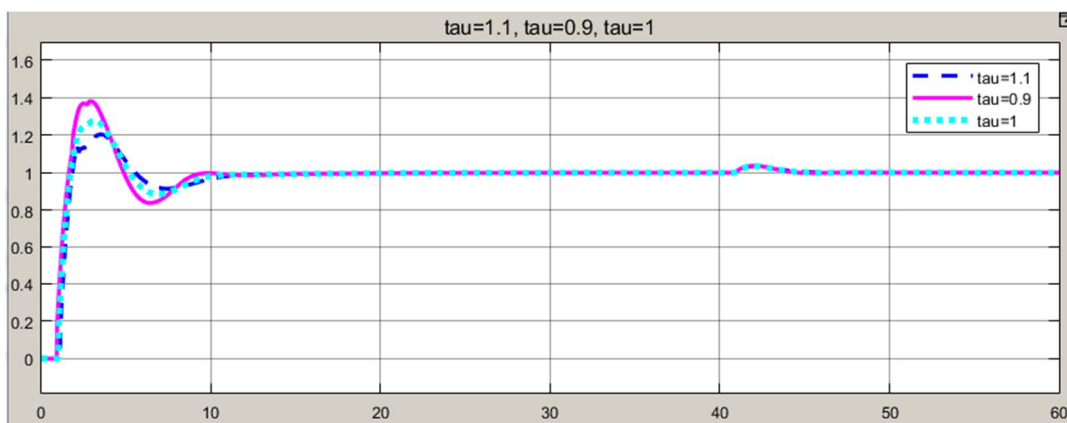


Рисунок 5 – Реакция системы с неустойчивым ОУ при изменении запаздывания
Figure 5 – The response of a system with unstable object when delay changes

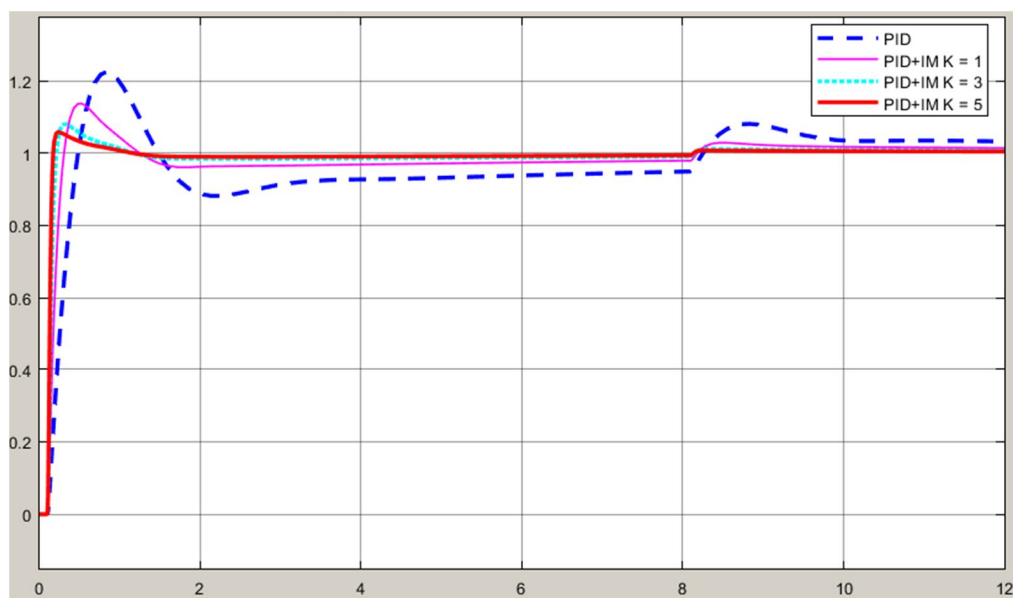


Рисунок 6 – Реакция системы с неустойчивым ОУ
Figure 6 – The response of a system with unstable object

цесс системы, но также значительно уменьшить влияние постоянного единичного возмущающего воздействия, поданного в момент времени $t = 8$ с. В таблице 3 представлены сравнительные характеристики полученных систем.

Таблица 3 – Сравнительные характеристики систем управления

Table 3 – Comparative characteristics of control systems

Оцениваемые характеристики	Система с ПИ-регулятором, представленная в работе [17]	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 1$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 3$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 5$
Время нарастания	8 с	1,5 с	1,5 с	1,5 с
Перерегулирование	24 %	14 %	8 %	6 %
Влияние возмущающих воздействий	8 %	3 %	1,2 %	0,74 %

Результаты исследования робастности системы к времени запаздывания представлены на рисунке 7. Запаздывание модели ОУ изменялось в диапазоне $\pm 10\%$ при $K = 1$. В результате при увеличении запаздывания перерегулирование возросло на 8 %, а при уменьшении перерегулирование снизилось на 3 %. При этом реакция на возмущающие воздействия меняется на 0,1 %.

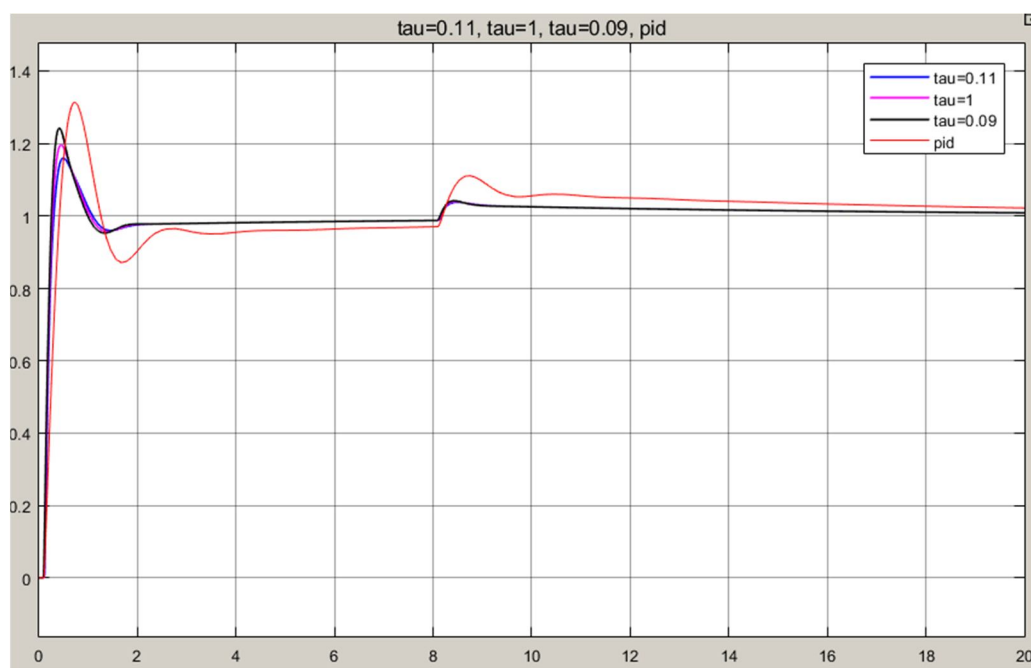


Рисунок 7 – Реакция системы с неустойчивым ОУ при изменении запаздывания

Figure 7 – The response of a system having the object with integrator when delay changes

Пример 4. В качестве последнего примера взят объект с интегратором второй степени $W(p) = \frac{e^{-0.1p}}{p^2}$. Параметры ПИД-регулятора взяты из [15] и равны $K_p = 9,8652$, $K_i = 2,3845$, $K_d = 9$. Результаты моделирования системы представлены на рисунке 8, а также описаны в таблице 4.

Результаты исследования робастности системы к изменению времени запаздывания в диапазоне $\pm 15\%$ представлены на рисунке 9 для параметра иммунного регулятора $K = 1$. Возрастание времени запаздывания привело к увеличению перерегулирования на 14 %, а уменьшение запаздывания – к снижению перерегулирования на 0,5 %, реакция на возмущающие воздействия осталась неизменной.

Таблица 4 – Сравнительные характеристики систем управления
Table 4 – Comparative characteristics of control systems

Оцениваемые характеристики	Система с ПИ-регулятором, представленная в работе [17]	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 1$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 3$	Система с иммунным ПИ-регулятором $K = 5$
Время нарастания	1,5 с	1 с	0,5 с	0,3 с
Перерегулирование	9 %	6 %	6 %	12 %
Влияние возмущающих воздействий	8 %	3,5%	2 %	1,6 %

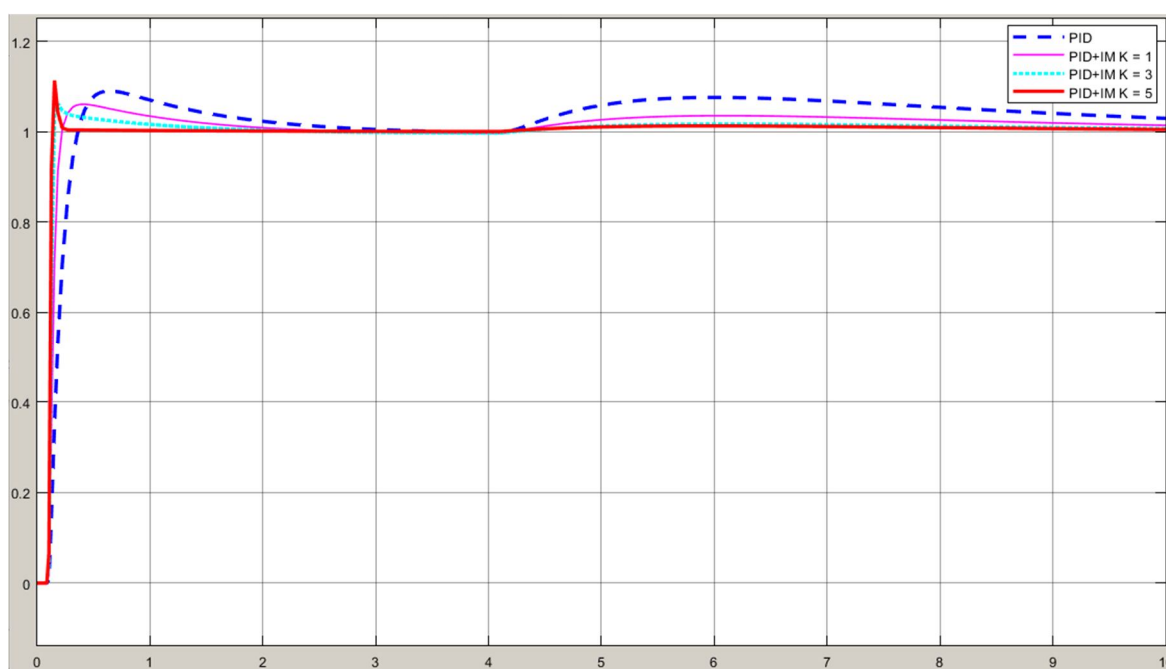


Рисунок 8 – Реакция системы с неустойчивым ОУ
Figure 8 – The reaction of a system with an unstable object

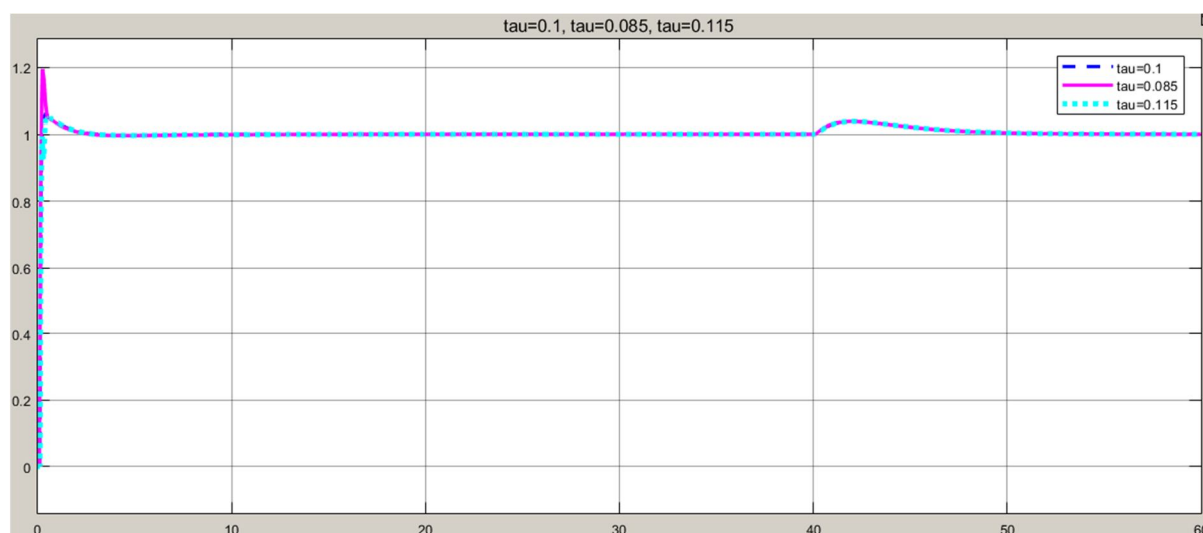


Рисунок 9 – Реакция системы с объектом с интегратором при изменении запаздывания
Figure 9 – The reaction of a system with an object with an integrator when delay changes

Заключение

Рассмотрена методика управления неустойчивыми объектами и объектами с интегратором, обладающими запаздыванием. В качестве управляющего устройства предложено использовать комбинацию иммунного и ПИД-регуляторов совместно с предиктором Смита. Достаточно подробно изложена методика построения иммунного регулятора, в основе которого лежит алгоритм работы биологической иммунной системы. Показана эффективность применения предложенных методов.

Одним из важнейших нововведений является то, что была получена система управления, обеспечивающая робастную устойчивость и робастное качество при достаточно больших допустимых пределах времени запаздывании. К тому же разработанная система позволяет эффективно уменьшить влияние возмущающих воздействий на работу системы в сравнении с классическим ПИД-регулированием.

Библиографический список

1. **Antsaklis P. J. Guest Ed.** Special Issue on Neural Networks in Control Systems, IEEE Control System Magazine, vol. 12 no. 2 (1992), pp. 8-57.
2. **Zitar R. A. and Hassoun M. N.** Neurocontrollers trained with rule extracted by a genetic assisted reinforcement learning system, IEEE Neural Networks, vol. 6, no. 4 (1995), pp. 859-879.
3. **S. Gherbi, F. Bouchared.** Optimal tuning of a fuzzy immune PID parameters to control a delayed system, International journal of electronical, vol. 8, no 6, 2014.
4. **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.
5. **Y. Lee, J. Lee and S. Park.** PID controller tuning for integrating and unstable processes with time-delay, Chemical Engineering Science, vol. 55, pp. 3481-3493, 2000.
6. **B. D. Tyreus and W. L. Luyben.** Tuning PI controllers for integrator/dead time processes, «Ind. Eng. Chem. Res.», vol. 31, pp. 2625-2628, 1992.
7. **G. J. Silva, A. Datta, S. P. Bhattacharyya.** PID Controllers for Time-Delay Systems. Boston-Berlin-Basel: Birkhäuser, 2005.
8. **Fu Dongmei,** Research of Immune Controllers, New York, 2007.
9. **Anusha A. V. N. L., Seshagiri Rao A.** Design and Analysis of IMC based PID controller for unstable systems for enhanced closed loop performance. IFAC Conference on Advances in PID control, Brescia (Italy), 2012.
10. **Ruscio D. D.** On Tuning PI controllers for integrating plus time delay systems. Modeling, Identification and Control, vol. 31, no. 4, 2010.
11. **Бобиков А. И., Бубнова Т. С.** Непрерывный иммунный самонастраивающийся ПИД-регулятор для объекта с запаздыванием. // Рязань, Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2017. № 59. С. 145-151.
12. **Takahashi K, Yamada T.** «Application of an Immune Feedback mechanism to control systems» JSME Int J, Series C, 1(2): 184. 1998.
13. **Zahedzadeh V., Marquez H. J., Chen T.** On the Input-Output Stability of Nonlinear Systems: Large Gain Theorem. American Control Conference Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, US SA June 11-13, 2008, pp. 3440-3445.
14. **Yonggang Peng, Xiaoping Luo, Wei Wei.** A New Control Method Based on Artificial Immune Adaptive Strategy. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, ISSN 1392-1215, vol. 19, no. 4, 2013.
15. **Hassaan G. A.** Controller tuning for disturbance rejection associated with delayed double integrating processes: Part V: 2DOF controller, International Journal Engineering and Techniques, vol. 1, no. 4, 2015.
16. **Caverly R. J. and Forbes J. R.** Nyquist Interpretation of the Large Gain Theorem. IFAC- Papers On Line 50-1, 2017, pp. 3606-3611.
17. **Saxena N., Chidambaram M.** Tuning of PID controllers for delay unstable systems with two unstable poles, IFAC-Papers On Line 49-1, 2016, pp. 801-806.
18. **Khalil H. K.** Nonlinear Systems, 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

UDC 681.515

MANAGING UNSTABLE OBJECTS AND OBJECTS WITH INTEGRATOR USING THE COMBINATION OF CONTINUOUS IMMUNE AND PID REGULATORS

A. I. Bobikov, Ph.D., associate professor, Department of Automation and Information Technologies in Control, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-7440-3118, e-mail: tanya.bubnova.94@mail.ru

T. S. Bubnova, post graduate student, Department of Automation and Information Technologies in Control, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-7085-0591, e-mail: tanya.bubnova.94@mail.ru

*This article presents a control algorithm for unstable objects and objects with an integrator with delay, using immune and PID controllers in conjunction with Smith predictor. **The aim of the work** is to increase the speed of control system, reduce the magnitude of overshoot, as well as reduce the influence of disturbing effects in comparison with the results of the system without immune regulator. In addition, the problem of ensuring the stability of the system is solved with the increase in delay time of the object within acceptable limits. The obtained simulation results implemented in Matlab / Simulink package clearly demonstrate the effectiveness of the developed design methodology.*

Key words: object with delay, object with integrator, unstable object, Smith predictor, continuous immune regulator, PID regulator.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-116-128

References

1. **Antsaklis, P. J. Guest Ed.**, Special Issue on Neural Networks in Control Systems, *IEEE Control System Magazine*, vol. 12 no. 2 (1992), pp. 8-57.
2. **Zitar R. A. and Hassoun M. N.** Neurocontrollers trained with rule extracted by a genetic assisted reinforcement learning system, *IEEE Neural Networks*, vol. 6, no. 4 (1995), pp. 859-879.
3. **S. Gherbi, F. Bouchared**, Optimal tuning of a fuzzy immune PID parameters to control a delayed system, *International journal of electronical*, vol. 8, no 6, 2014.
4. **Popova A. A.** Nepreryvnyj immunnyj regulyator / A. A. Popova. *Matematika i informacionnye tekhnologii v prilozheniyah: materialy Mezhdunarodnogo studencheskogo simpoziuma*. SGU-2015. Sochi, 2015. pp. 103-105. (in Russian)
5. **Y. Lee, J. Lee and S. Park**, PID controller tuning for integrating and unstable processes with time-delay, *Chemical Engineering Science*, vol. 55, pp. 3481-3493, 2000.
6. **B. D. Tyreus and W. L. Luyben**. Tuning PI controllers for integrator/dead time processes, *«Ind. Eng. Chem. Res.»*, vol. 31, pp. 2625-2628, 1992.
7. **G. J. Silva, A. Datta, S.P. Bhattacharyya**. PID Controllers for Time-Delay Systems. Boston-Berlin-Basel: Birkhäuser, 2005.
8. **Fu Dongmei**. Research of Immune Controllers, New York, 2007.
9. **Anusha A. V. N. L., Seshagiri Rao A.** Design and anlisi of IMC based PID controller for unstable systems for enhanced closed loop performance. *IFAC Conference on Advances in PID control*, Brescia (Italy), 2012.
10. **Ruscio D. D.** Ontuning PI controllers for integrating plus time delay systems. *Modeling, Identification and Control*, vol. 31, no. 4, 2010.
11. **Bobikov A. I., Bubnova T. S.** Nepreryvnyj immunnyj samonastraivayushchijsya PID-regulyator dlya obekta s zapazdyvaniem. Ryazan', *Vestnik Ryazan State Radio Engineering University*. 2017. no. 59. pp. 145-151.
12. **Takahashi K, Yamada T.** «Application of an Immune Feedback mechanism to control systems» *JSME Int J, Series C*, 1(2): 184. 1998.

13. **Zahedzadeh V., Marquez H. J., Chen T.** On the Input-Output Stability of Nonlinear Systems: Large Gain Theorem. *American Control Conference Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, US SA* June 11-13, 2008, pp. 3440-3445.
14. **Yonggang Peng, Xiaoping Luo, Wei Wei.** A New Control Method Based on Artificial Immune Adaptive Strategy. *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, ISSN 1392-1215, vol. 19, no. 4, 2013.
15. **Hassaan G. A.** Controller tuning for disturbance rejection associated with delayed double integrating processes: Part V: 2DOF controller, *International Journal Engineering and Techniques*, vol.1, no. 4, 2015.
16. **Caverly R. J. and Forbes J. R.** Nyquist Interpretation of the Large Gain Theorem. *IFAC-Papers On Line* 50-1, 2017, pp. 3606-3611.
17. **Saxena N., Chidambaram M.** Tuning of PID controllers for delay unstable systems with two unstable poles, *IFAC-Papers On Line* 49-1, 2016, pp. 801-806.
18. **Khalil H. K.** *Nonlinear Systems*, 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.