

Влияние вида тестовых сигналов на результат численной оптимизации регуляторов

Вадим А. Жмудь¹, Иван Л. Рева¹, Любомир В. Димитров²

¹ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), ²Технический университет Софии (София, Болгария)

Аннотация: Управление робототехническими объектами, как и любыми другими механическими и прочими устройствами, зачастую требует достижения не только нулевой статической ошибки, то есть ошибки при устранении влияния постоянной помехи, но также и нулевой динамической ошибки при отработке линейно нарастающего изменения задания или помехи. Традиционно считается, что если система успешно обрабатывает ступенчатое задание, то она столь же успешно обрабатывает и все остальные виды заданий, поскольку их можно представить, как сумму бесконечного числа бесконечно малых ступенчатых скачков. На практике это не так. Если система качественно обрабатывает скачок, то при отработке линейно нарастающего воздействия в системе может иметь место постоянная по величине ошибка. Для подавления этой ошибки требуется дополнительный интегратор в регуляторе. Если при оптимизации такого регулятора использовать ступенчатый скачок в качестве тестового задания, то численная оптимизация не приведет к правильному расчету коэффициента в тракте с двойным интегрированием. Если же в качестве тестового задания использовать линейно нарастающий сигнал, то полученная система будет обладать избыточным перерегулированием при отработке ступенчатого воздействия. В статье впервые предлагается методика решения этой задачи путем численной оптимизации регулятора, используемого при моделировании одновременно двух систем, одна из которых обрабатывает ступенчатое воздействие, а другая – линейно нарастающее воздействие.

Ключевые слова: управление, замкнутые контуры, регуляторы, проектирование управляющих систем, цифровое управление, обратная связь, оптимизация, астатизм, ПИ-регуляторы, ПИД, ПИ²Д

ВВЕДЕНИЕ

Астатическое управление объектами требуется во многих прикладных задачах [1–4]. Оно состоит в том, что за счет интегратора в регуляторе статическая ошибка равна нулю. Если на вход такой системы подается команда изменить выходную величину на постоянное приращение (ступенчатый скачок), то по истечении некоторого времени, равного длительности переходного процесса, эта команда будет выполнена с нулевой ошибкой. Также такая система полностью подавляет влияние действующей на нее постоянной помехи.

В механических системах, прежде всего,

робототехнических, часто также требуется система с астатизмом второго порядка. Это свойство означает, что система обрабатывает с нулевой ошибкой не только ступенчатое воздействие, но и линейно нарастающее воздействие. Это в равной мере относится к изменению задания и к помехе. Такое свойство, как правило, достигается за счет применения двух интеграторов в регуляторе.

Как правило, предполагается, что система с астатизмом второго порядка точнее, чем система с астатизмом первого порядка, из чего можно сделать заключение (как далее будет показано, ошибочное) о том, что такая система лучше обрабатывает помеху и управляющее воздействие в виде ступенчатого скачка. На самом деле исследования показывают, что настройки регулятора, обеспечивающие лучшую отработку ступенчатого скачка, отличаются от настроек, обеспечивающих лучшую отработку линейно нарастающего воздействия. Если же требуется, чтобы система лучше обрабатывала и ступенчатые воздействия, и линейно нарастающие, то необходимо отыскивать компромиссное решение этих двух задач.

Настоящая статья вскрывает противоречия между рассмотренными двумя требованиями и предлагает методику достижения требуемого компромисса путем численной оптимизации регуляторов с использованием соответствующих целевых функций.

Традиционная структура системы с регулятором показана на *Рис. 1*. Ошибка системы при отработке изменения задания $V(t)$ по форме в точности совпадает с ошибкой при отработке такого же изменения помехи $H(t)$, а по знаку эти ошибки противоположны. Поэтому достаточно изучить поведение системы при отработке задания, чтобы обеспечить качественную отработку как задания, так и помехи. Качество системы определяется качеством всего контура, которое обеспечивает правильный выбор математической модели регулятора. Если используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ), или пропорционально-дифференциально-интегральный регулятор (ПИД), то система, как правило, обладает астатизмом первого порядка, то есть статическая ошибка равна нулю только при отработке ступенчатого воздействия. Для получения

астатизма второго порядка в регулятор должно вводиться дополнительное интегрирование. Получаемый регулятор называют ПИ²Д, где двойка указывает на наличие двух последовательно соединенных интеграторов в регуляторе.

Для расчета коэффициентов регулятора целесообразно использовать метод численной оптимизации [1–37]. Этот метод реализуется по

схеме, показанной на *Рис. 2*. А именно, в структуре для оптимизации содержится собственно модель системы, представляющая собой модель контура по *Рис. 1*, а также анализатор качества системы и оптимизатор регулятора. Для простоты также эти два блока можно объединять в общий блок под названием, например, «анализатор-оптимизатор».

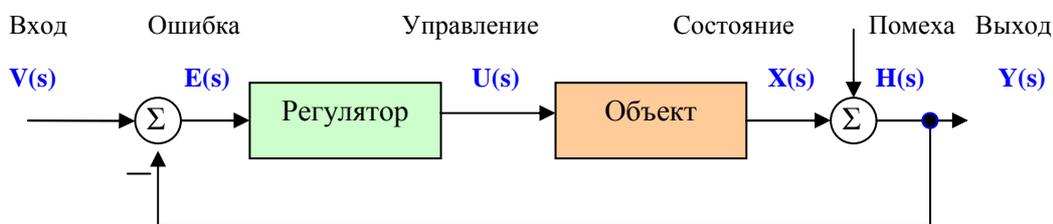


Рис.1 . Традиционная схема системы автоматического управления с единичной обратной связью

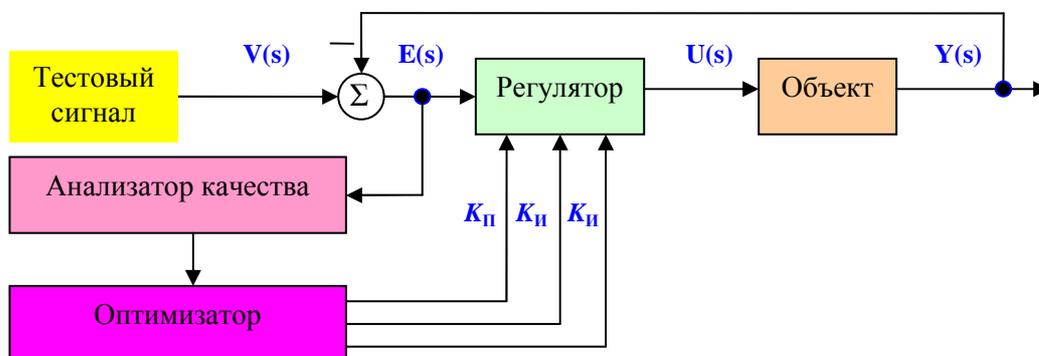


Рис.2 . Традиционная структура для численной оптимизации регулятора

При работе системы по *Рис. 2* необходимо на вход модели системы подавать тестовые воздействия. Традиционно такие воздействия формируются в виде единичного ступенчатого скачка. Если требуется система, которая обладает астатизмом первого порядка, такое тестовое воздействие вполне приемлемо. Если же требуется астатизм второго порядка, то при использовании тестового воздействия в виде скачка оптимизатор не будет иметь причин для изменения коэффициента в тракте с двойным интегрированием, поэтому результат оптимизации будет неудовлетворительным. Следовательно, требуется использовать тестовый сигнал в виде линейно нарастающего воздействия.

Однако, исследования показали, что если использовать линейно нарастающий тестовый сигнал, то по результатам оптимизации получается такая система, в которой качество отработки ступенчатого воздействия неудовлетворительно, а именно: в системе при отработке скачка присутствует излишне большое перерегулирование.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть объект описывается передаточной функцией в виде фильтра низких частот третьего порядка и звена чистого запаздывания:

$$W(s) = \frac{\exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + \xi T_2 s + 1)} \quad (1)$$

Здесь s – аргумент функции Лапласа, остальные величины в числителе и знаменателе справа – постоянные коэффициенты.

Требуется рассчитать регулятор, обеспечивающий качественную отработку ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия. Требование качества состоит в уменьшении насколько возможно величины ошибки и сокращении насколько возможно времени затухания ошибки до нуля или до пренебрежимо малой величины.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для управления объектом предлагается ПИД-регулятор, а если этого недостаточно, то регулятор с двойным интегрированием, называемый ПИ²Д-регулятор.

Предлагается численная оптимизация с помощью средств моделирования и оптимизации *VisSim*. Простейшая стоимостная функция для оптимизации имеет следующий вид [6–10]:

$$\Psi_1(T, e) = \int_0^T |e(t)| dt. \quad (2)$$

Здесь $e(t)$ – ошибка управления, t – время с начала переходного процесса, T – момент окончания моделирования.

Также в стоимостную функцию может быть введено дополнительное слагаемое следующего вида:

$$\Psi_2(T, e) = \int_0^T \max\{0, e(t) \frac{de(t)}{dt}\} dt. \quad (3)$$

При суммировании функций (2) и (3)

целесообразно использовать весовой коэффициент. Предположительно, перед вторым слагаемым такой коэффициент должен иметь значение много больше единицы.

Результат оптимизации предлагается контролировать по виду переходных процессов.

Вследствие указанной выше проблемы с тестовым сигналом предлагается осуществлять одновременное моделирование двух идентичных систем, в каждой из которых идентичны и объект, и регулятор. При этом параметры регулятора задаются оптимизатором. Но на вход одной из систем подаются в качестве тестовых сигналов ступенчатые воздействия, а на вход другой системы подаются линейно нарастающие воздействия. Схема соответствующей структуры показана на *Рис. 3*.

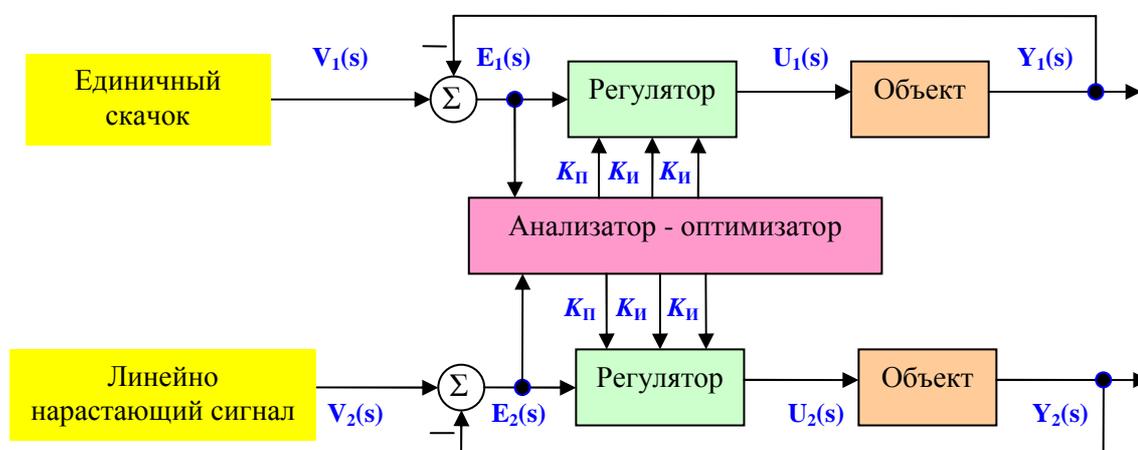


Рис.3. Предлагаемая структура для численной оптимизации регулятора

3. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР И РЕЗУЛЬТАТЫ

Зададим модели объекта конкретные численные значения, например, следующие:

$$W(s) = \frac{\exp(-10s)}{(20s+1)(s^2+2s+1)}. \quad (4)$$

Модель объекта в программе *VisSim* показана на *Рис. 4*, модель всей системы показана на *Рис. 5*. Оптимизация осуществлялась при использовании ступенчатого задания, а также при использовании линейно нарастающего воздействия. В первом случае получены следующие коэффициенты регулятора: $k_{\text{п}} = 2,29$; $k_{\text{и}} = 0,0543$; $k_{\text{д}} = 9,5$. Во втором случае получены следующие коэффициенты регулятора: $k_{\text{п}} = 3,06$; $k_{\text{и}} = 0,496$; $k_{\text{д}} = 23,9$. Полученные переходные процессы в результате оптимизации показаны на *Рис. 6* и *Рис. 7*. При этом на *Рис. 6* приведены результаты отработки каждой из полученных систем линейно нарастающего задания, а на *Рис. 7* приведены результаты отработки каждой из систем задания в виде ступенчатого скачка.

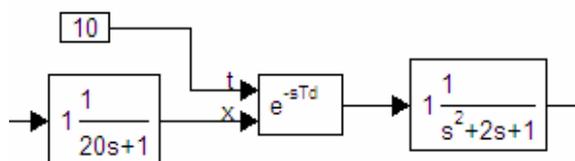


Рис. 4. Модель объекта управления

Анализ полученных процессов на *Рис. 6* показывает, что система, оптимизированная для линейно нарастающего задания, лучше обрабатывает такое задание, статическая ошибка относительно мала. Система, оптимизированная для отработки ступенчатого скачка, обрабатывает линейно нарастающее воздействие с существенной статической ошибкой (на *Рис. 6* она составляет 0,2 единицы).

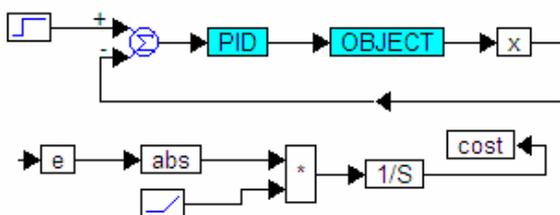


Рис. 5. Модель структуры для оптимизации регулятора в системе

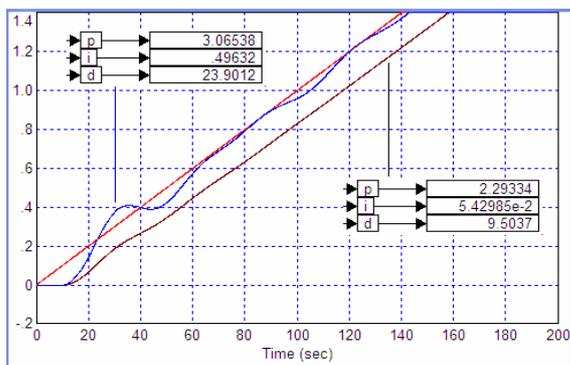


Рис. 6. Результат оптимизации системы при линейно нарастающем задании: нижняя линия -

Вместе с тем, анализ полученных процессов на Рис. 7 показывает, что система, оптимизированная для линейно нарастающего задания, хуже обрабатывает ступенчатое задание: перерегулирование составляет около 180 %, система склонна к колебаниям, за время 200 с процесс еще не заканчивается. Система, оптимизированная для отработки ступенчатого скачка, обрабатывает такое воздействие быстро (за 100 с) и с небольшим перерегулированием (25 %).

Вывод 1: Система, оптимизированная для отработки ступенчатого скачка, плохо обрабатывает линейно нарастающее воздействие,

и наоборот, система, оптимизированная для отработки линейно нарастающего воздействия, плохо обрабатывает ступенчатый скачок.

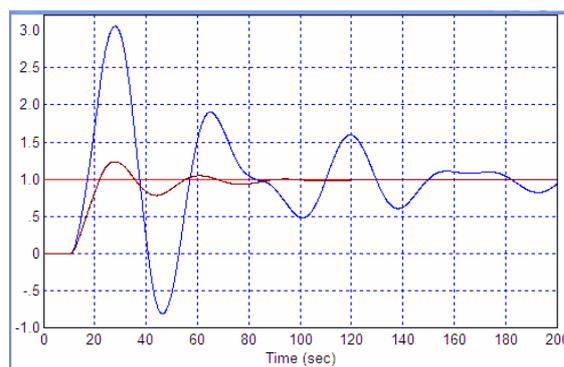


Рис. 7. Результат оптимизации при ступенчатом скачке

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для отыскания компромиссного решения предлагается оптимизация ПИД-регулятора, который используется одновременно в двух одинаковых системах, одна из которых обрабатывает ступенчатое воздействие, а другая обрабатывает линейно нарастающее воздействие.

На Рис. 8 показана структура для оптимизации регулятора на основе этого принципа. Здесь стоимостная функция является суммой стоимостных функций вида (2), для вычисления двух слагаемых используются ошибки в двух моделируемых системах. При суммировании без весовых коэффициентов в результате получается следующий набор коэффициентов ПИД-регулятора: $k_P = 2,59$; $k_I = 0,211$; $k_D = 13,97$. Получаемые процессы показаны на рис. 9.

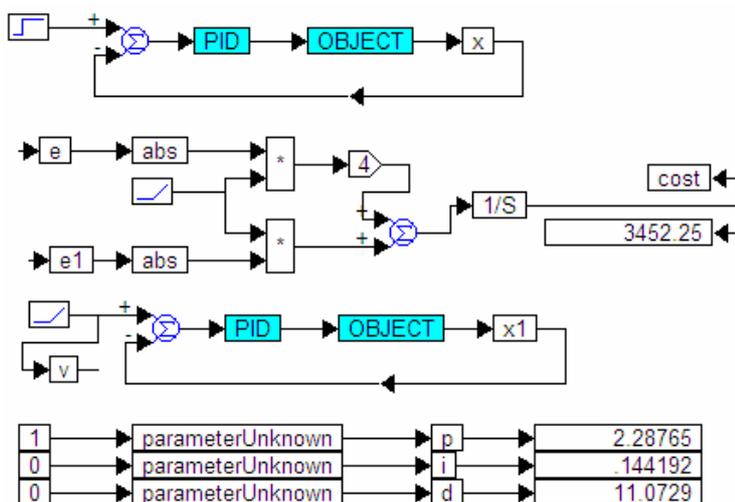


Рис. 8. Структура модели, содержащая две системы и одно устройство для оптимизации ПИД-регулятора

Как видим из Рис. 9, достигнут некоторый компромисс. Перерегулирование при отработке

ступенчатого скачка снизилось вдвое в сравнении с регулятором, оптимизированным для обработки линейно нарастающего воздействия, то есть до величины 90 %. Статическая ошибка при обработке линейно нарастающего воздействия меньше 0,05 единиц, то есть в 4 раза меньше, чем в регуляторе, оптимизированном для обработки только ступенчатого скачка.

Для снижения перерегулирования можно ввести весовой коэффициент перед слагаемым, зависящим от ошибки в системе, которая обрабатывает ступенчатый скачок. На Рис. 10 показан переходный процесс с системой, полученной с таким коэффициентом, равным четырем. Перерегулирование при обработке скачка снизилось почти до 60 %, статическая ошибка при обработке линейно нарастающего воздействия возросла примерно вдвое. Дальнейшее увеличение этого весового коэффициента позволяет и далее снизить перерегулирование при обработке скачка ценой роста статической ошибки при обработке нарастающего воздействия.

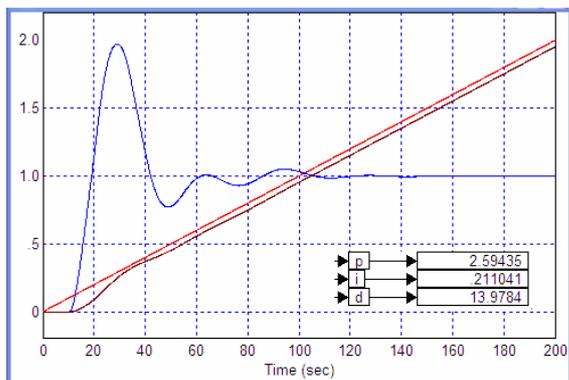


Рис. 9. Переходные процессы в системе, рассчитанной в результате совместной оптимизации двух систем

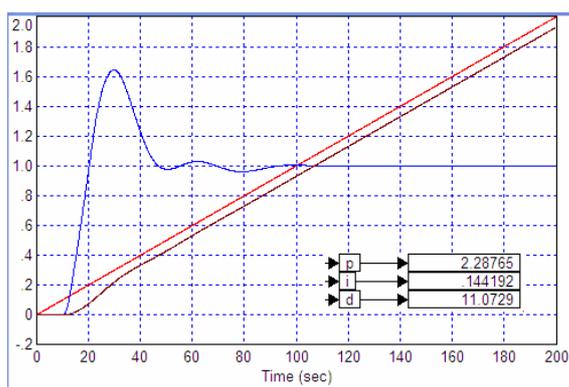


Рис. 10. То же самое с весовым коэффициентом 4

Вывод 2: Система с ПИД-регулятором, оптимизированная по компромиссу между качеством обработки ступенчатого скачка и качеством обработки линейно нарастающего воздействия, обеспечивает требуемый компромисс, но в итоге качество обработки обоих этих воздействий недостаточно высоко.

5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ПИ²Д-РЕГУЛЯТОРА

Система с астатизмом второго порядка должна содержать два интегратора в регуляторе. Поэтому предлагается использовать структуру, показанную на Рис. 11, для оптимизации ПИ²Д-регулятора. Данный регулятор содержит помимо традиционных пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего трактов также тракт двойного интегрирования. Поэтому в структуре отыскивается четыре коэффициента. Также в этой структуре введено дополнительное слагаемое вида (3) в стоимостную функцию. В этой системе при обработке ступенчатого воздействия перерегулирование составляет около 85 %. Время затухания обоих процессов составляет примерно 60 с.

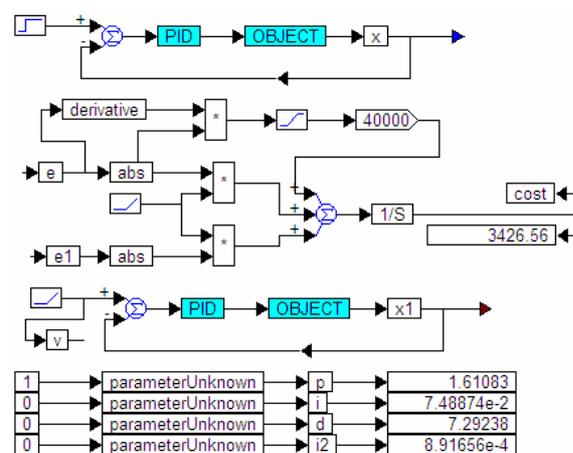


Рис. 11. Итоговая структурная схема для оптимизации ПИ²Д-регулятора

Введенное слагаемое за счет выбора весового коэффициента позволяет осуществить компромиссный поиск коэффициентов, которые бы обеспечили приемлемое качество переходных процессов при обработке обоих видов входных сигналов. Но даже ведение весового коэффициента величиной 1000 не дает существенного снижения перерегулирования. Результат такой оптимизации показан в виде графиков переходных процессов на Рис. 12–Рис. 14.

Например, при выборе весового коэффициента, равного 10 000, перерегулирование при обработке скачка снижается до 40 %. Время затухания переходного процесса при обработке обоих видов воздействий составляет приблизительно 100 с. Соответствующие процессы показаны на рис.

Например, при выборе весового коэффициента, равного 20 000, перерегулирование при обработке скачка снижается до 25 %. Время затухания переходного процесса при обработке обоих видов воздействий составляет приблизительно 160 с. Дальнейшее увеличение весового коэффициента видится нецелесообразным, так как снижение перерегулирования

достигается ценой слишком большого увеличения длительности переходного процесса.

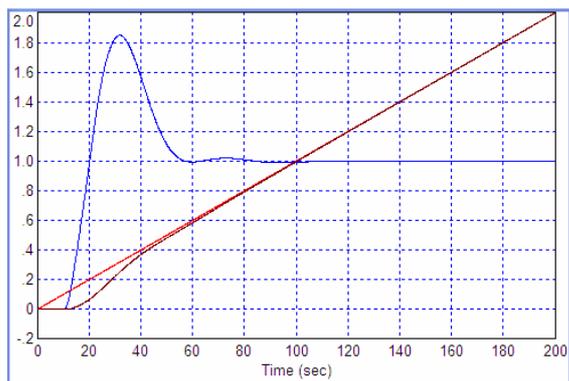


Рис. 12. Результат оптимизации с весовым коэффициентом 1000

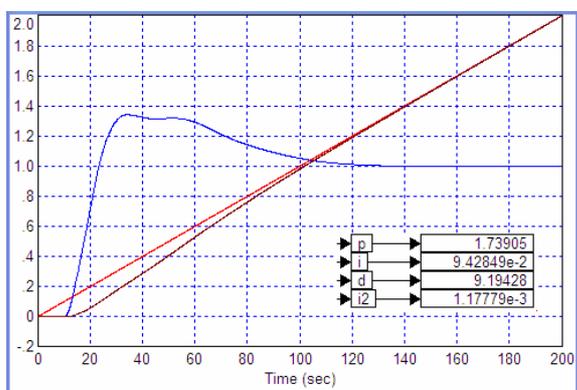


Рис. 13. Результат оптимизации с весовым коэффициентом 10 000

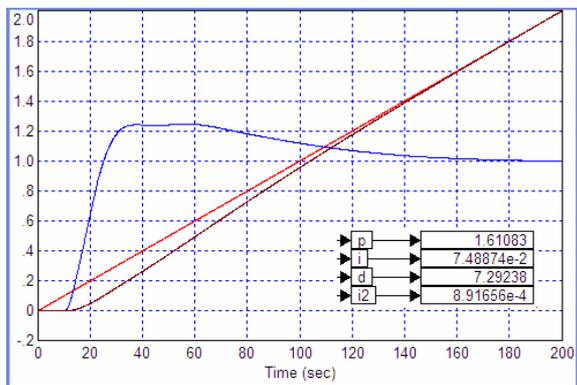


Рис. 14. Результат оптимизации с весовым коэффициентом 20 000

Вывод 3: Система с ПИ²Д-регулятором, оптимизированная по компромиссу между качеством обработки ступенчатого скачка и качеством обработки линейно нарастающего воздействия, обеспечивает требуемый компромисс, в итоге качество обработки обоих этих воздействий достаточно высоко.

6. ОБЪЕКТ, СКЛОННЫЙ К КОЛЕБАНИЯМ

Зададим модели объекта конкретные численные значения, например, следующие:

$$W(s) = \frac{\exp(-10s)}{(s+1)(s^2+0.01s+1)}. \quad (5)$$

Данный объект склонен к колебаниям. На Рис. 15 показан отклик такого объекта на ступенчатый скачок. Предложенная структура для оптимизации успешно решает даже задачу управления таким объектом. Действительно, результат оптимизации показан на рис. 13. Отклик системы на ступенчатый скачок имеет перерегулирование 30 %, длительность процесса составляет около 130 с.

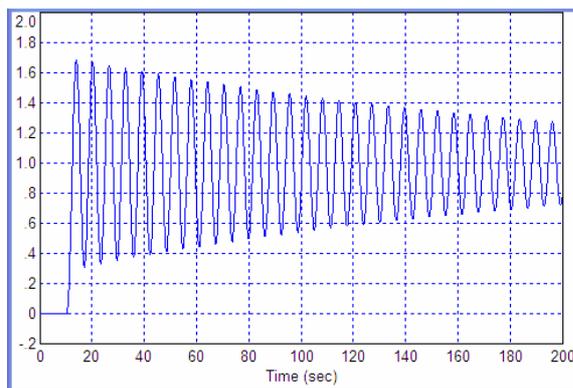


Рис. 15. Отклик объекта (5) на ступенчатый скачок

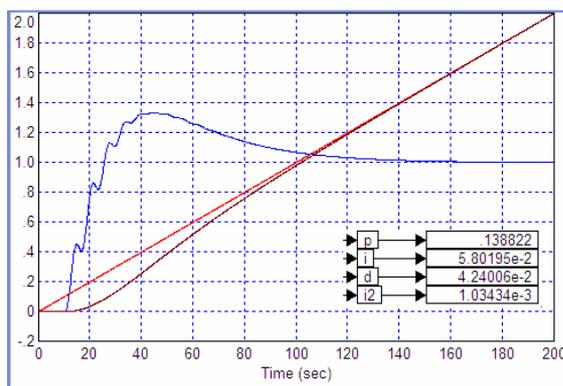


Рис. 16. Результат оптимизации системы с объектом (5) по структуре Рис. 11 с весовым коэффициентом 20 000

Вывод 4: Предложенная методика успешно работает с объектом, склонным к колебаниям.

7. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД

Поскольку исследуемая система линейна, можно предполагать, что сумма откликов систем на два типа воздействий равна отклику системы на сумму этих воздействий. Осуществим оптимизацию последней системы для случая обработки сигнала, представляющего собой сумму ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия. Результат оптимизации показан на Рис. 17. Видно, что коэффициенты полученного регулятора (показаны на врезке графика) отличаются от коэффициентов, показанных на Рис. 13. На Рис. 18 показаны переходные процессы в этой системе в отклик на ступенчатый скачок и на

линейно нарастающее воздействие по отдельности. Видно, что ошибка в обоих случаях не затухает даже за 200 с. То есть полученная система существенно хуже.

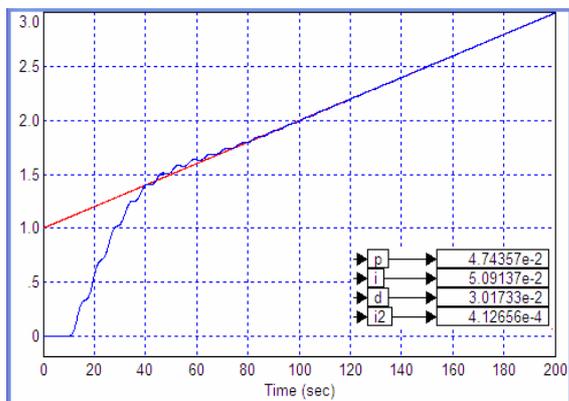


Рис. 17. Результат оптимизации системы по отклику на сумму ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия

Осуществим оптимизацию этой же системы для случая обработки сигнала, представляющего собой разность линейно нарастающего воздействия и ступенчатого скачка. Результат оптимизации показан на Рис. 19. Коэффициенты полученного регулятора вновь отличаются от коэффициентов, показанных на Рис. 15, но они более близки к коэффициентам на Рис. 13. На Рис. 20 показаны переходные процессы в этой системе в отклик на ступенчатый скачок и на линейно нарастающее воздействие по отдельности. Видно, что ошибка в обоих случаях затухает за 140 с. То есть полученная система соизмерима с системой, полученной при оптимизации двух систем совместно.

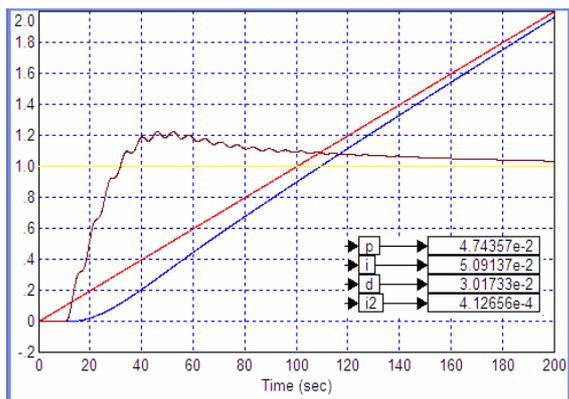


Рис. 18. Отклики системы по отдельности на ступенчатый скачок и на линейно нарастающее воздействие

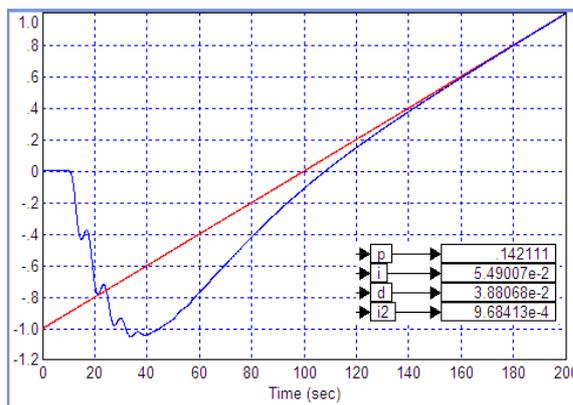


Рис. 19. Результат оптимизации системы по отклику на разность линейно нарастающего воздействия и ступенчатого скачка

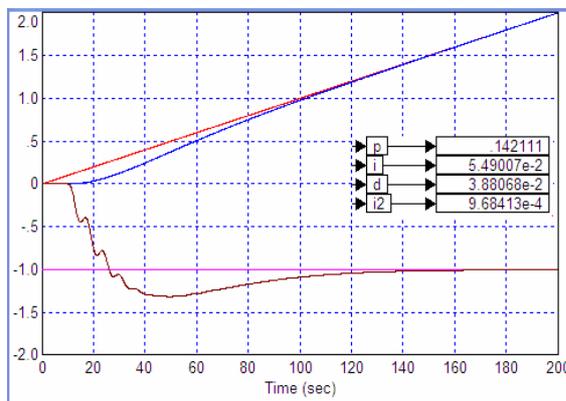


Рис. 20. Отклики системы по отдельности на ступенчатый скачок и на линейно нарастающее воздействие

Вывод 5: Альтернативная методика успешна только если используются воздействия, противоположные по знаку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье изучено влияние выбора тестового сигнала на результат оптимизации регулятора на примере ПИД и ПИ²Д структур. Показано, что если требуется качественная обработка линейно нарастающих сигналов, оптимизация системы только по сигналам указанного вида неэффективна. В этом случае полученная система характеризуется чрезмерно большим перерегулированием при обработке ступенчатых воздействий. Предложена методика для проектирования эффективной системы, состоящая в численной оптимизации регулятора для двух параллельно работающих систем, обрабатывающих различные по характеру воздействия. Данная методика может быть упрощена, если на единственную систему подавать при оптимизации линейную комбинацию этих воздействий с противоположными знаками. Если оба воздействия действуют в одном и том же направлении, такая упрощенная методика неэффективна.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, проект 2014/138, название проекта: “Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического регулирования. М.: Высш. Шк. 2006. 365 с.: ил.
- [2] Клиначёв Н. В. Теория систем автоматического регулирования и управления: Учеб.-метод. комплекс. Offline версия 3.6. Челябинск, 2005. см. также: URL: <http://model.exponenta.ru/tau lec.html>.
- [3] Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384с.
- [4] Клиначев Н. В. VisSim в России; студенческая версия программы VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [5] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления в среде VisSim // Труды семинара по автоматике и программной инженерии, посвященного юбилею ОАО «Новосибирский институт программных систем» (ОАО «НИПС») 16.04.2012, Новосибирск, типогр. ЗАО «КАНТ». С.90–140. – с сайта http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [6] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [7] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, 2010 Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [8] Ишимцев Р.Ю., Жмудь В.А. Применение составных интегральных критериев для оптимизации регуляторов линейных объектов. Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008. Новосибирск, т.7, 2008. с. 151-154.
- [9] Воевода А. А., Жмудь В. А. Сходимость алгоритмов оптимизации регулятора для объекта с ограничителем и с запаздыванием // Научный вестник НГТУ. 2007. № 4 (29). С.179–184.
- [10] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для системы с обратной связью. Патент на изобретение РФ RU 2368933 С1. G05B 11/14. Оpubл.27.09.09. Бюл. № 27. Заявка № 2008110243, Правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [11] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для многомерного объекта. Патент на полезную модель РФ RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Оpubл.10.05.10. Бюл. № 27. Заявка № 2009138894/22 от 20.10.2009, правообладатель: ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет и Институт лазерной физики СО РАН.
- [12] Жмудь В. А., Семибаламут В. М., Воевода А. А. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. Патент на изобретение № 2457529. Приоритет от 11.01.2011. Заявка № 2011100407. Зарегистрировано 27.07.2012. Срок действия до 11.01.2031. Правообладатель: Учреждение РАН Институт лазерной физики Сибирского отделения (RU)
- [13] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [14] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
- [15] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 47–61.
- [16] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин, О.Д. Ядрышников. Неаналитические методы расчета ПИД-регуляторов. Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – 40 с.
- [17] Пат. 2554291, МПК G01R 23/02, G01P 3/36. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью / В. А. Жмудь, А. Н. Заворин; НГТУ - 2014112628; заяв. 01.04.14; опуб. 27.06.15. – 9 с.
- [18] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.
- [19] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [20] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [21] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [22] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [23] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [24] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on

- Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [25] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [26] Жмудь В.А. Динамика мехатронных систем: учеб. пособие / В.А. Жмудь, Г.А. Французова, А.С. Востриков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 176 с. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [27] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [28] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.
- [29] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2540461. Заявка № 2013145173, приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 19 декабря 2014 г. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 4.
- [30] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2541684. Заявка № 2013146115, приоритет от 15.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 15 января 2015 г. Срок действия патента истекает 25.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 5.
- [31] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2566339. Приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 20 октября 2015 г. Бюлл. № 29. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36.
- [32] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2584925. Приоритет от 05.03.15. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.04.16. Бюллетень № 14. Срок действия патента истекает 05.03.35. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [33] В.А. Жмудь, Заворин А. Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент на изобретение № 2554291. Приоритет от 01.04.14. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.06.15. Бюллетень № 18. Срок действия патента истекает 01.04.34. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [34] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Регулятор для систем с обратной связью. Патент РФ RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Опубл.27.09.08. Бюл. № 27. Заявка № 2008108410/22 от 04.03.2008, правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [35] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
- [36] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упредителя Смита. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 57–67.
- [37] STM32VLDISCOVERY – платформа для построения простой системы сбора данных. Лабораторная работа: учеб.-метод. пособие / В. А. Жмудь, В. Г. Трубин, А. В. Ескин, А. Л. Печников. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2014. – 174 с. – 50 экз. - ISBN 978-5-7782-2599-2.

Influence of the Type of the Test Signals onto the Result of the Numerical Optimization of Controllers

V. A. ZHMUD, I. L. REVA, L. V. DIMITROV

Abstract: Successful control of robototetical objects, as well as by any other mechanical and other devices often requires not only the achievement of a zero static error, i.e. an error of eliminating of the influence of constant noise, but also the zero dynamic error in suppressing of the ramp change of the prescribed value or the disturbansy. Traditionally, it is believed that if the system successfully fulfills the job step, it is equally successfully fulfills all other kinds of jobs, because the latter can be represented as the sum of an infinite number of infinitely small step jumps. In practice this is not so. If the system is qualitatively fulfills the jump, then at working with linearly rising influence a constant in magnitude error can occur in the system. To suppress this error an extra integrator in the regulator is required. If step jump is supplied in the input as the test signal, then the numerical optimization will not lead to the correct calculation of the coefficient of the double integration link in the result of the optimization procedure. If, however, ramp signal is used as the test one, then the resulting system will have excessive overshoot when developing step changing of the prescribed value or disturbance. In the paper, the first time the technique to solve this problem by numerical optimization of the controller is used in the simulation at the same time of the two systems, one of which is using a stepped input signal and the other – a linearly increasing one (ramp signal).

Key words: management, closed circuits, controls, design of control systems, digital control, feedback, optimization, astatism, PI controllers, PID, PI2D

REFERENCES

- [1] Vostrikov A. S., Francuzova G. A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. M.: Vyssh. Shk. 2006. 365 s.: il.
- [2] Klinachjov N. V. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija i upravljenija: Ucheb.-metod. kompleks. Offline versija 3.6. Cheljabinsk, 2005. sm. takzhe: URL: http://model.exponenta.ru/tau_lec.html.
- [3] D'jakonov V.P. VisSim+Mathcad+MATLAB.

- Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie. – M.: SOLON-Press, 2004. – 384s.
- [4] Klinachev N. V. VisSim v Rossii; studencheskaja versija programmy VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [5] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija v srede VisSim // Trudy seminarov po avtomatike i programmnoj inzhenerii, posvjashhennogo jubileju OAO «Novosibirskij institut programmyh sistem» (OAO «NIPS») 16.04.2012, Novosibirsk, tipogr. ZAO «KANT». S.90–140. – s sajta http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [6] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 c.
- [7] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, 2010 Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [8] Ishimcev R.Ju., Zhmud' V.A. Primenenie sostavnyh integral'nyh kriteriev dlja optimizacii reguljatorov linejnyh ob#ektov. Materialy IX mezhdunarodnoj konferencii «Aktual'nye problemy jelektronnoho priborostroenija» APJeP-2008. Novosibirsk, t.7, 2008. s. 151-154.
- [9] Voevoda A. A., Zhmud' V. A. Shodimost' algoritmov optimizacii reguljatora dlja ob#ekta s ogranichitelem i s zapazdyvaniem // Nauchnyj vestnik NGTU. 2007. № 4 (29). S.179–184.
- [10] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie RF RU 2368933 S1. G05B 11/14. Opubl.27.09.09. Bjul. № 27. Zajavka № 2008110243, Pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [11] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja mnogomernogo ob#ekta. Patent na poleznuju model' RF RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.10.05.10. Bjul. № 27. Zajavka № 2009138894/22 ot 20.10.2009, pravoobladatel': GOU VPO Novosibirskij gosudarstvennyj tehnickij universitet i Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [12] Zhmud' V. A., Semibalamut V. M., Voevoda A. A. Adaptivnaja sistema dlja regulirovanija i stabilizacii fizicheskij velichin. Patent na izobrenie № 2457529. Prioritet ot 11.01.2011. Zajavka № 2011100407. Zaregistrovano 27.07.2012. Srok dejstvija do 11.01.2031. Pravoobladatel': Uchrezhdenie RAN Institut lazernoj fiziki Sibirskogo otdelenija (RU)
- [13] Zhmud' V. A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknutyh sistem avtomaticheskogo upravlenija. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s.
- [14] V.A. Zhmud', O.D. Jadrishnikov. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovanijem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). S. 24–29.
- [15] V.A. Zhmud', L.V. Dimitrov. Osnovnye oshibki pri optimizacii reguljatorov dlja zamknutyh sistem upravlenija. FGBOU VO NGTU (Novosibirsk, Rossija), tehnickij univetsitet Sofii (Sofija, Bolgarija). Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2016. № 2 (16). S. 47–61.
- [16] V.A. Zhmud', A.N. Zavorin, O.D. Jadrishnikov. Neanaliticheskie metody rascheta PID-reguljatorov. Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2013. – 40 c.
- [17] Pat. 2554291, MPK G01R 23/02, G01P 3/36. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju / V. A. Zhmud', A. N. Zavorin; NGTU - 2014112628; zajav. 01.04.14; opub. 27.06.15. - 9 c.
- [18] V.A. Zhmud', A.N. Zavorin. Metod proektirovanija jenergosberegajushhijh reguljatorov dlja slozhnyh ob#ektov s chastichno neizvestnoj model'ju. V kn.: Problemy upravlenija i modelirovanija v slozhnyh sistemah. Trudy XVI Mezhdunarodnoj konferencii 30 ijunja – 03 ijulja 2014 g., Samara. Rossija. S. 557–567.
- [19] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [20] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [21] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [22] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [23] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [24] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [25] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [26] Zhmud' V.A. Dinamika mehatronnyh sistem: ucheb. posobie / V.A. Zhmud', G.A. Francuzova, A.S. Vostrikov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. – 176 s. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [27] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [28] V.A. Zhmud', A.N. Zavorin. Metod proektirovanija jenergosberegajushhijh reguljatorov dlja slozhnyh ob#ektov s chastichno neizvestnoj model'ju. V kn.: Problemy upravlenija i modelirovanija v slozhnyh

- sistemah. Trudy XVI Mezhdunarodnoj konferencii 30 ijunja – 03 ijulja 2014 g., Samara. Rossiya. S. 557–567.
- [29] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2540461. Zajavka № 2013145173, prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 19 dekabnja 2014 g. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 4.
- [30] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2541684. Zajavka № 2013146115, prioritet ot 15.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 15 janvarja 2015 g. Srok dejstvija patenta istekaet 25.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 5.
- [31] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2566339. Prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 20 oktjabnja 2015 g. Bjull. № 29. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36.
- [32] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2584925. Prioritet ot 05.03.15. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 27.04.16. Bjulleten' № 14. Srok dejstvija patenta istekaet 05.03.35. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [33] V.A. Zhmud', Zavorin A. N. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2554291. Prioritet ot 01.04.14. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 27.06.15. Bjulleten' № 18. Srok dejstvija patenta istekaet 01.04.34. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [34] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Reguljator dlja sistem s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.27.09.08. Bjul. № 27. Zajavka № 2008108410/22 ot 04.03.2008, pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [35] V.A. Zhmud', O.D. Jadrjshnikov. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). S. 24–29.
- [36] V.A. Zhmud', O.D. Jadrjshnikov. Optimizacija reguljatora dlja mnogokanal'nyh ob#ektov s razvitiem idei upreditelja Smita. Avtomatika i programmaja

inzhenerija. 2014. № 1 (7). S. 57–67.

- [37] STM32VLDISCOVERY – platforma dlja postroenija prostoju sistemy sbora dannyh. Laboratornaja rabota: ucheb.-metod. posobie / V. A. Zhmud', V. G. Trubin, A. V. Eskin, A. L. Pechnikov. - Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2014. - 174 s. - 50 jezk. - ISBN 978-5-7782-2599-2.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, (Новосибирск, Россия), доктор технических наук, доцент, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий.

E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Любомир Ванков Димитров – проректор по международным связям, профессор машиностроительного факультета Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, Почетный доктор НГТУ, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).

E-mail: lyubomir.dimitrov@tu-sofia.bg



Иван Леонидович Рева – декан факультета Автоматики и вычислительной техники НГТУ, к.т.н. Основное направление научных исследований - защита речевой информации. Имеет более 20 публикаций

E-mail: reva@corp.nstu.ru