

Снижение динамической ошибки системы управления объектом с запаздыванием при численной оптимизации регулятора

А.Ю. Ивойлов¹, Г. Рот², В.А. Жмудь¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, ² Университет Зигена, Зиген, Германия

Аннотация: В статье решается задача обеспечения наиболее быстрого вхождения ошибки системы автоматического управления в зону сверхмалой ошибки, менее 0,1 %. В качестве примера модели объекта управления выбран наиболее часто встречающийся вид, представленный последовательным включением фильтра первого порядка и звена запаздывания. Пример взят из публикации, решающей задачу синтеза регулятора, что позволяет сравнить достигнутые результаты с теми, которые опубликованы в этой статье. Также рассмотрено влияние изменения коэффициентов и структуры объекта, а именно, при изменении порядка фильтра вдвое и при изменении постоянных времени фильтра в два раза в большую и в меньшую сторону. Продемонстрирована эффективность предлагаемого решения, состоящая в увеличении степени одного из характерных компонент стоимостной функции, представляющей собой время с момента начала переходного процесса. Эта компонент в целевой функции играет роль весовой функции при модуле ошибки, который затем интегрируется для получения окончательного значения целевой (стоимостной) функции. Результаты подтверждены математическим моделированием в программе *VisSim*.

Ключевые слова: регулятор, управление, обратная связь, ошибка, длительность переходного процесса, управление, динамическая ошибка, численная оптимизация, симуляция, *VisSim*

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокоточных систем управления с помощью контура отрицательной обратной связи развивается как отрасль технической науки уже 90 лет [1]. В литературе встречаются публикации, посвященные решению только одной задачи, то есть расчету регулятора для конкретной математической модели объекта [2]. Эту ситуацию следует признать неудовлетворительной, поскольку вопрос представляется так, как если бы для каждой конкретной математической модели объекта следует решать задачу проектирования регулятора отдельным

методом, новым, специальным, который не был ранее известен. Если же при решении этой задачи используется уже известный метод, то ценность статьи явно снижается, поскольку она в таком случае является описанием известной задачи известным способом с прогнозируемым результатом. Зачастую авторы в своих публикациях ошибочно или преднамеренно игнорируют наличие известных методов решения задачи, представляя ситуацию так, как если бы используемые ими методы решения этой задачи были наилучшими из известных, а список известных методов при этом явно меньше существующего. Это представляет опубликованный результат как новый и значимый, тогда как в свете полного перечня известных методов такой результат является далеко не лучшим из возможных [2].

Настоящая статья привлекает внимание читателя к подобным публикациям, опровергая укороченный перечень методов, демонстрируя, что подобный представленный список как будто специально составлен из методов далеко не актуальных, устаревших, соревнование с которыми уже не представляет никакого интереса для науки.

Помимо того в статье решается задача отыскания эффективного метода ускорения переходного процесса в системе по показателю достижения малой ошибки, по меньшей мере в 50 раз меньше традиционной величины, что основано на требованиях к прецизионным системам автоматического управления [3–12]. В классических трудах по теории управления снижение ошибки до величины 5 % от стартовой величины считается моментом окончания переходного процесса. Однако время вхождения в пятипроцентную зону для большинства прецизионных систем далеко не является временем завершения переходного процесса. Для таких систем погрешность требуется снижать по меньшей мере еще в 50 раз, т. е. до значения 0,1 %. Если переходный процесс экспоненциальный, то если переходный процесс до достижения ошибки менее 5 % составил некоторую длительность τ , то по истечении вдвое большего времени 2τ ошибка станет равной 5 % от пяти процентов, т. е. 0,25 %. Поэтому время вхождения в зону 0,1 % будет еще больше, чем 2τ . В связи с этим

актуальна разработка таких методов проектирования регуляторов, которые обеспечивали бы более быстрое вхождение сигнала ошибки в зону 0,1 %.

Среди наиболее эффективных методов проектирования регуляторов для наиболее распространенных моделей объекта, какими являются фильтр первого порядка с последовательно включенным звеном запаздывания, наиболее эффективным и крайне редко упоминаемым в публикациях является метод численной оптимизации [3–12]. В публикациях, описывающих применение этого метода, не решается указанная проблема, что делает актуальным разработку методики решения этой задачи.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть модель объекта известна. В работе [2] ставится задача синтеза ПИ- и ПИД-регулятора для объекта, представляющего собой последовательное соединение фильтра первого порядка и звена запаздывания, и приводится якобы полный перечень методов решения задачи синтеза регулятора для этого объекта. Также приводятся результаты синтеза регулятора в виде графиков переходных процессов, как показано на *Рис. 1*. К сожалению, в этой статье не приведены численные значения коэффициентов этого регулятора.

Авторы утверждают, что для решения такой задачи целесообразно принять в расчет следующие методы:

- а) метод оптимального модуля;
- б) метод аperiodической устойчивости;
- в) метод Копеловича;
- г) метод Куна;
- д) метод Коэна;
- е) метод Чина и Хронса;
- ж) метод настройки на заданный запас устойчивости.

Отметим, что известен метод Коэна–Куна, а в отдельности эти методы практически не встречаются в современной литературе.

Указанные методы исследованы авторами для решения задачи синтеза регулятора для единственной рассмотренной модели объекта следующего вида:

$$W_o = \frac{0,3}{20s + 1} \exp(-50s). \quad (1)$$

В статье утверждается, что наилучшими методами являются первые два, в случае применения остальных методов переходный процесс в 2,5 раза (500 с против 200 с для первых двух методов), последний в списке метод приводит к автоколебательному переходному процессу.

Тем самым из данной статьи следует вывод, что для данной задачи имеется лишь два адекватных метода решения поставленной задачи, причем, полученные результаты являются, по мнению авторов, наилучшими для

данного объекта. Авторы пользуются сомнительным термином «наиболее оптимальным» применительно к первым двум методам.

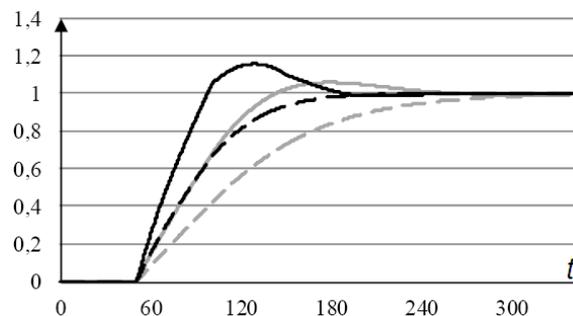


Рис. 1. Переходные процессы в системе из статьи [2]: сплошная линия – метод «а», прерывистая – метод «б», при этом серая линия – система с ПИ-регулятором, черная линия – система с ПИД-регулятором

С авторами статьи можно не согласиться по следующим позициям:

1. Приведенный перечень методов страдает неполнотой, причем выпущен, как минимум, один из наиболее эффективных методов, метод численной оптимизации.

2. При перечислении методов желательно давать ссылку хотя бы на один литературный источник, причем желательно именно на такой, который вскрывает суть этого метода.

3. Численные значения регуляторов в случае решения подобной задачи, желательно приводить в статье.

4. Единственного численного примера недостаточно для каких-либо выводов.

5. ПИД-регулятор, вероятно, не требуется, поскольку ресурсы ПИ-регулятора не все исчерпаны, приведенный результат можно улучшить.

6. Критерия, по которому делается предпочтение тому или иному результату, не обозначено.

Из определенных рассуждений следует, что авторы, естественно, руководствовались общими соображениями о том, что желательно достижение наибольшего быстродействия и наименьшего перерегулирования, однако, все же не понятно, какую пару из двух пар графиков следует предпочесть: ту, которая показана сплошными линиями и имеет перерегулирование, но заканчивается визуально несколько раньше, либо ту, которая показана прерывистыми линиями, не имеет перерегулирования, но заканчивается несколько позже.

Указанные возражения еще не столь существенны в сравнении со следующими: метод численной оптимизации не только дает лучшие результаты более простым способом, его преимущество еще и в том, что он дает не единственный результат, который может быть принят или не принят, а позволяет путем

соответствующего выбора и корректировки стоимостной функции откорректировать результат в сторону обеспечения тех показателей качества переходного процесса, которые наиболее важны по технологическим причинам. Например, может потребоваться совершенно исключить перерегулирование, или, напротив, при допущении в определенных границах этого перерегулирования требуется обеспечить как можно более быстрое вхождение ошибки в определенные наперед заданные границы. В иных случаях требуется достижение некоторого компромисса между этими требованиями.

Нам представляется, что перерегулирование на уровне 20 % является излишне большим, поэтому результат с использованием ПИД-регулятора с этой позиции хуже, чем результат с ПИ-регулятором по тому же методу. Следовательно, если уже имеется переходный процесс с перерегулированием порядка 7 %, полученный с ПИ-регулятором (сплошная серая линия на *Рис. 1*), то применение дополнительного канала управления (дифференцирующего), т. е. использование ПИД-регулятора по тому же методу, должно дать либо уменьшение перерегулирования при сохранении длительности процесса, либо уменьшение длительности процесса при сохранении перерегулирования, либо уменьшение обоих этих показателей. В приведенном же результате перерегулирование возросло втрое и метода уменьшения этой величины из статьи не просматривается.

Также нельзя согласиться с утверждением автором о том, что длительность переходного процесса составляет 200 с. Для системы с ПИ-регулятором (серые графики) это утверждение не справедливо, переходный процесс по уровню 5 % составляет 220 – 260 с. Для системы с ПИД-регулятором эту величину можно принять равной 180 с.

Кроме того, как отмечено выше, не рассматривается вопрос времени до снижения ошибки до значения 0,1 % и ниже.

Таким образом, в статье решаются следующие задачи.

1. Для объекта с передаточной функцией вида (1) спроектировать ПИ-регулятор, обеспечивающий переходные процессы не хуже тех, которые представлены серыми графиками на *Рис. 1*.

2. Предложить метод обеспечения наиболее быстрого снижения ошибки до значений 0,1 % и ниже.

3. Исследовать возможности метода при изменении модели объекта.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Предлагается использовать метод численной оптимизации в программе *VisSim* с применением стоимостной функции следующего вида:

$$F_C(T) = \int_0^T |e(t)| t^R dt. \quad (2)$$

Здесь T – время моделирования, $e(t)$ – ошибка в системе управления, t – время, R – целый показатель степени от одного и выше.

Структура для моделирования и оптимизации в программе *VisSim* указанной задачи показана на *Рис. 2*. Степень R задается в блоке “*pow*” при выборе его параметров, при необходимости модель объекта может быть отредактирована. Основанием для ввода этого показателя степени служит тот факт, что в этом случае по мере хода времени переходного процесса остаточная ошибка вносит все больший вклад в величину стоимостной функции, а крутизна этого увеличения с ростом показателя степени растет экспоненциально.

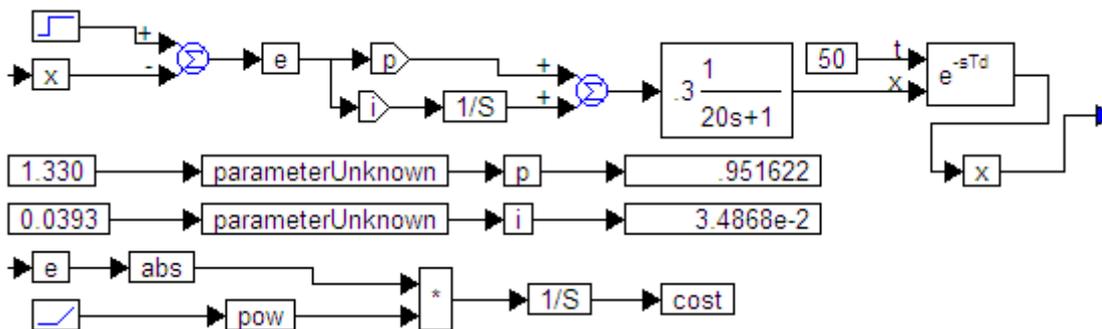


Рис. 2. Структура для моделирования и оптимизации регулятора для объекта (1) со стоимостной функцией (2) в программе *VisSim*

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ

На *Рис. 3* показаны переходные процессы в системах, полученных при значениях коэффициента R от единицы до четырех. По мере роста этого коэффициента переходный

процесс заканчивается все быстрее. Одновременно с этим падает величина перерегулирования. Тем самым получается, что два наиболее значимых критерия качества переходного процесса, перерегулирование и длительность

процесса, которые чаще всего вступают в противоречие, что видно также и из графиков на *Рис. 1*, в данном случае удается улучшить совместно. Из этого следует заключить, что, по меньшей мере, для исследуемого примера, увеличение показателя степени чрезвычайно полезно.

На *Рис. 4* показаны в крупном масштабе процессы по ошибке управления.

Значения коэффициентов получаемого ПИ-регулятора даны в *Таблице 1*. Изменение ошибки управления при изменении показателя степени от пяти до восьми в крупном масштабе показано на *Рис. 5*.

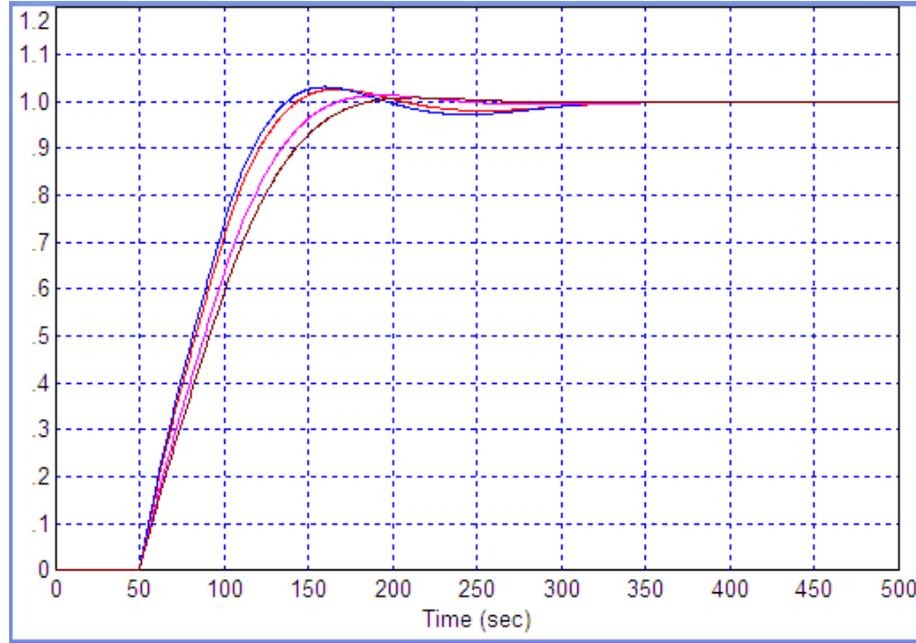


Рис 3. Переходные процессы в системе по структуре *Рис. 3* при изменении показателя степени от 1 до 4

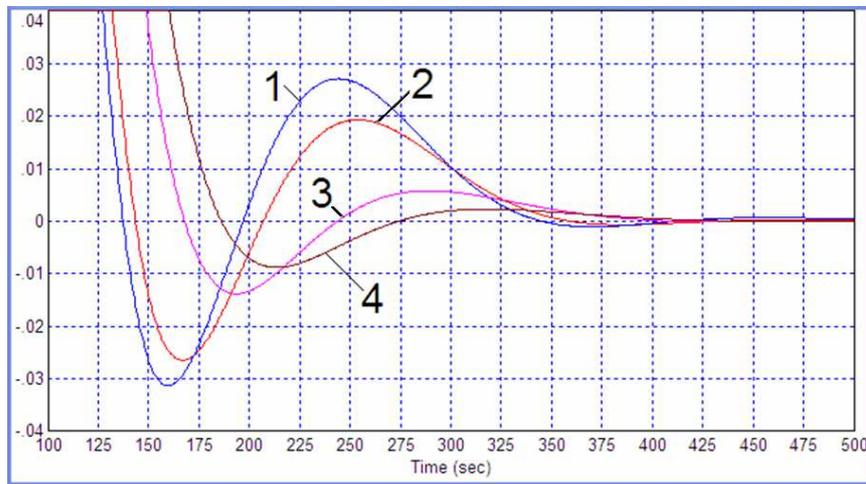


Рис 4. Изменение ошибки управления (начиная с сотой секунды) в системе по структуре *Рис. 3* при изменении показателя степени от 1 до 4: номер графика соответствует значению показателя степени

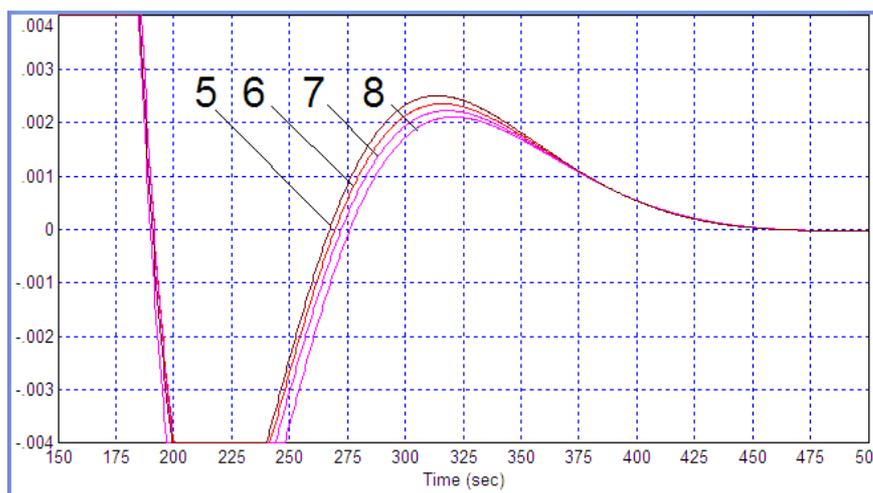


Рис 5. Изменение ошибки управления (начиная с сотой секунды) в системе по структуре Рис. 3 при изменении показателя степени от 5 до 8: номер графика соответствует значению показателя степени

Таблица 1.

Коэффициенты ПИ-регулятора в зависимости от показателя степени

R	1	2	3	4	5	6	7	8
K_P	1,33	1,25	1,049	0,9516	0,951	0,9461	0,9426	0,941
K_I	0,0393	0,0387	0,036	0,03487	0,03468	0,03462	0,034597	0,03464

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЛИТЕРАТУРНЫМ ИСТОЧНИКОМ

Авторы статьи [3] в качестве показательных графиков сочли целесообразным последовательно подавать два вида воздействия на систему. Во-первых, с началом моделирования на вход системы подается ступенчатый единичный скачок. Во-вторых, с задержкой в 310 с на вход управления также поступает единичный ступенчатый скачок. Результиру-

ющий переходный процесс показан на Рис. 5. Для сравнения на Рис. 6 показаны процессы в системе с ПИ-регулятором, рассчитанным при $R=8$, происходящие при тех же условиях. Видно, что процессы соответствуют лучшему расчету для ПИД-регулятора, а именно, черной прерывистой линии на Рис. 5. Таким образом, с ПИ-регулятором легко получены результаты, идентичные лучшей настройке ПИД-регулятора по версии авторов статьи [3].

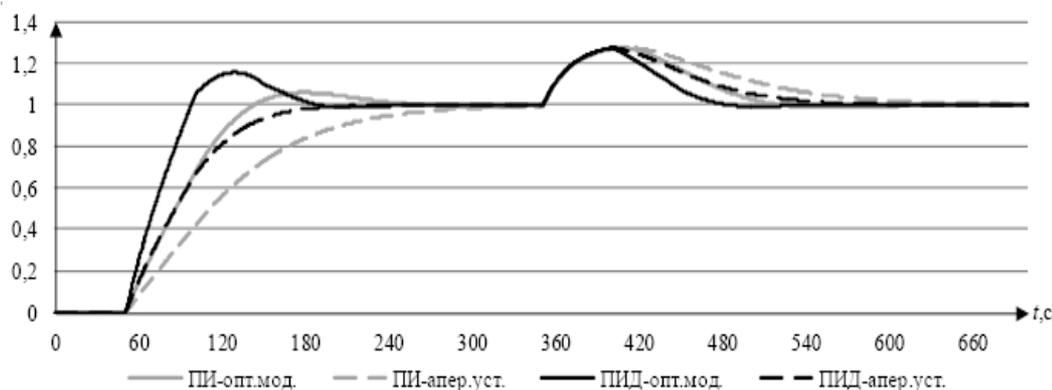


Рис. 5. Переходные процессы в системе из статьи [2] при подаче последовательно двух скачков, сначала на вход системы, затем на управляющий вход объекта: сплошная линия – метод «а», прерывистая – метод «б», при этом серая линия – система с ПИ-регулятором, черная линия – система с ПИД-регулятором

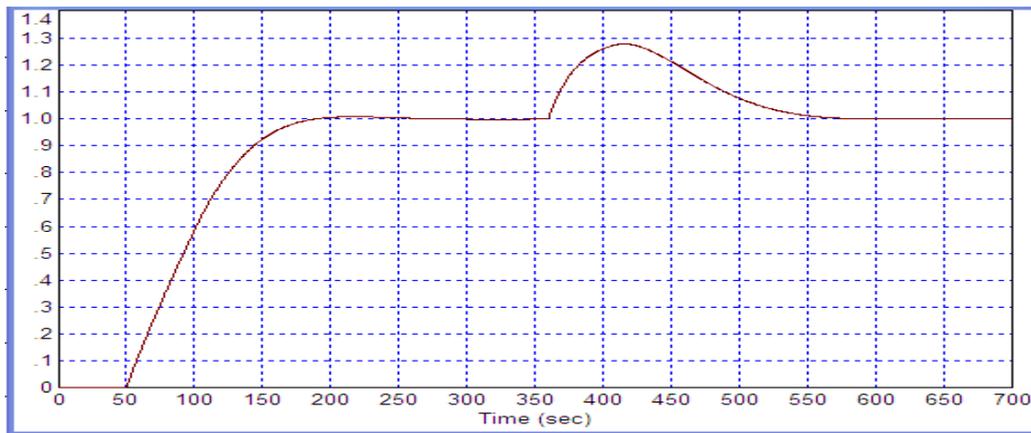


Рис. 6. Процессы в системе с ПИ-регулятором, рассчитанным при $R = 8$, происходящие при тех же условиях, что и на графиках, показанных на Рис. 5

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПРИ ПРОЧИХ РАВНЫХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрим пример, когда объект имеет в знаменателе полином не первого порядка, а второго. При этом постоянные времени фильтра выберем такими, чтобы их сумма совпала с постоянной времени фильтра первого порядка в исходной системе. Передаточная функция объекта в этом случае будет иметь следующий вид:

$$W_o = \frac{0,3}{(10s + 1)(10s + 1)} \exp(-50s). \quad (3)$$

Рассмотрим переходный процесс в системе при использовании регулятора, рассчитанного для случая (1), т. е. регулятор из последнего столбца Таблицы 1. Основанием для этого служит тот факт, что при раскрытии скобок в знаменателе соотношения (3) получается поли-

ном, первые два члена которого совпадают с полиномом в знаменателе соотношения (1). Тем самым исследуется влияние третьего слагаемого в знаменателе, равного $100s^2$. Также осуществим оптимизацию по показанной выше схеме, в результате получим регулятор со следующими параметрами: $K_{\text{П}} = 0,6695$, $K_{\text{И}} = 0,03018$. На Рис. 8 показаны графики изменения ошибки управления в тех же условиях.

Видно, что оптимизация с учетом третьего члена полинома дает существенное уменьшение ошибки управления в конце переходного процесса: последний пик уменьшен в 4 раза. При этом время вхождения в зону ошибки не более 0,1 % почти не изменилось и даже несколько возросло, хотя и несущественно.

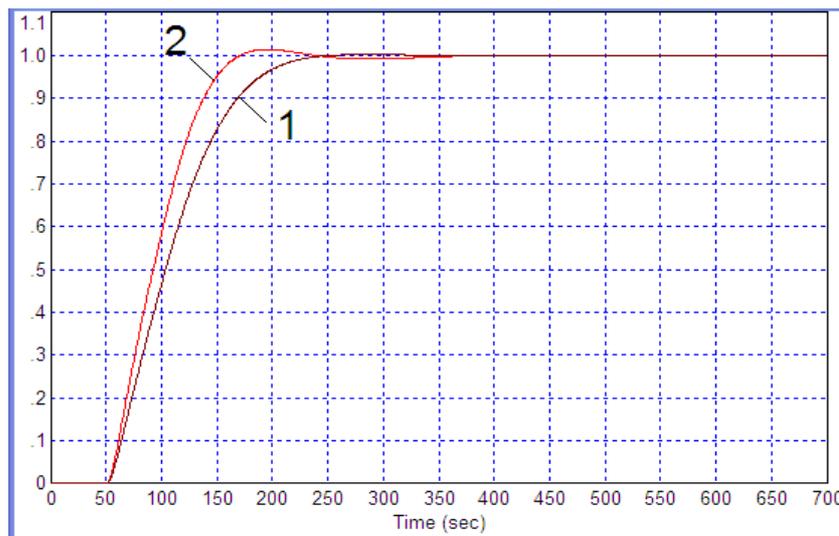


Рис. 7. Процессы в системе с объектом (3) и с рассчитанным для него ПИ-регулятором при $R = 8$ (линия 1), а также с этим же объектом и с регулятором, рассчитанным для объекта (1) при тех же условиях (линия 2)

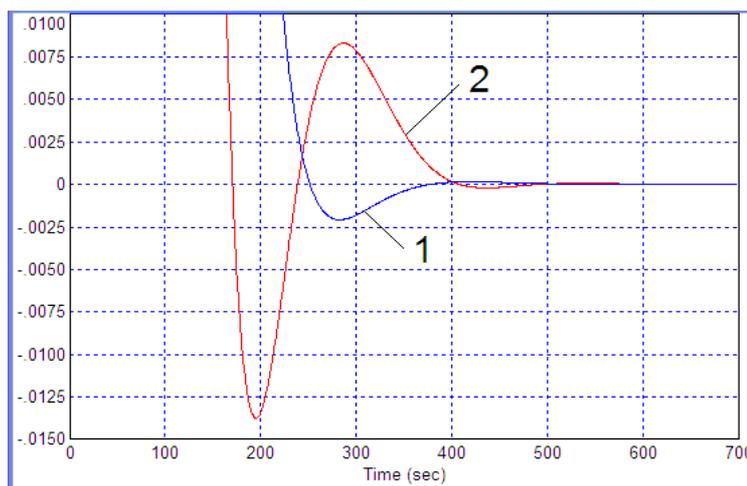


Рис. 8. Графики изменения ошибки управления в тех же условиях, что на Рис. 7

Из этого следует вывод, что в данном случае метод работоспособен даже в том случае, если в модели объекта не учтены старшие члены полинома значенателя, так как соотношение (1) можно считать приближением соотношения (3), полученное отбрасыванием этого члена.

5. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ И УМЕНЬШЕНИЯ ИНЕРЦИОННОСТИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА

В сравнении с примером предыдущего раздела сначала увеличим вдвое, а затем уменьшим также вдвое постоянные времени в знаменателе полинома (3), и сопоставим переходные процессы в системе с регулятором, рассчитанным ранее и с регулятором, оптимизированным с учетом знания точной модели объекта.

Рассмотрим объект с передаточной функцией

$$W_o = \frac{0,3}{(20s + 1)(20s + 1)} \exp(-50s). \quad (4)$$

Оптимизация с коэффициентом $R = 1$ дает следующие коэффициенты ПИ-регулятора: $K_{\text{П}} = 1,5268$, $K_{\text{И}} = 0,031698$. Оптимизация с коэффициентом $R = 8$ дает коэффициенты: $K_{\text{П}} = 0,9275$, $K_{\text{И}} = 0,02695$.

На Рис. 9 показаны переходные процессы в полученных системах, а на Рис. 10 приведены графики изменения ошибки управления. Видно, что при $R = 8$ ошибка позже входит в зону 1 % значения (355 с против 315 с) и даже позже входит в зону 0,5 % (330 с против 290 с), но раньше входит в зону 0,15 % (380 с против 500 с). Достоинства графика по линии 2 не очевидны в сравнении с достоинствами графика линии 1. Можно считать, что качество переходных процессов приблизительно соизмеримы, если нет специфического требования по какому-то конкретному уровню ошибки среди указанных величин.

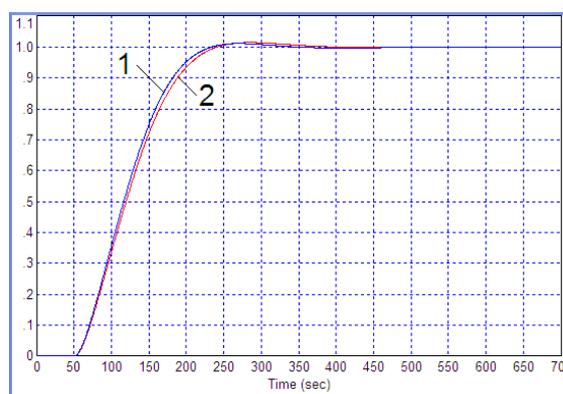


Рис. 9. Процессы в системе с объектом (4) и с рассчитанным для него ПИ-регулятором при $R = 1$ (линия 1), а также с этим же при $R = 8$ (линия 2)

Рассмотрим объект с передаточной функцией

$$W_o = \frac{0,3}{(5s + 1)(5s + 1)} \exp(-50s). \quad (5)$$

Оптимизация с коэффициентом $R = 1$ дает следующие коэффициенты ПИ-регулятора: $K_{\text{П}} = 1,054$, $K_{\text{И}} = 0,0415$. Оптимизация с коэффициентом $R = 8$ дает коэффициенты: $K_{\text{П}} = 0,575$, $K_{\text{И}} = 0,0334$.

На Рис. 11 показаны переходные процессы в полученных системах, а на Рис. 12 приведены графики изменения ошибки управления. Достоинства системы, полученной при $R = 8$, несомненны. Действительно, видно, что при $R = 8$ отсутствует перерегулирование, и хотя процесс практически монотонный, быстродействие в нем выше. Ошибка раньше входит в любую зону: в зону 1 % через 210 с (против 260 с), в зону 5 % через 240 с (против 290 с), в зону 0,1 % через 250 с (против более чем 400 с) и так далее. Качество переходного процесса линии 2 предпочтительны по всем показателям.

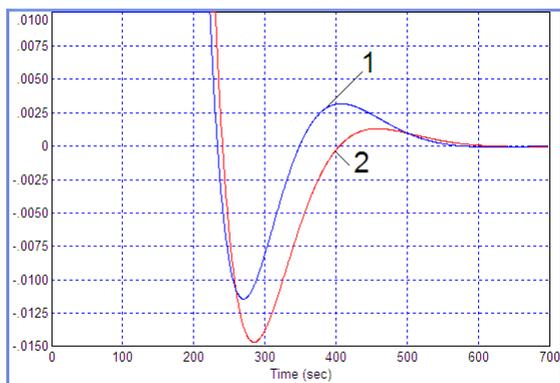


Рис. 10. Графики изменения ошибки управления в тех же условиях, что на Рис. 9

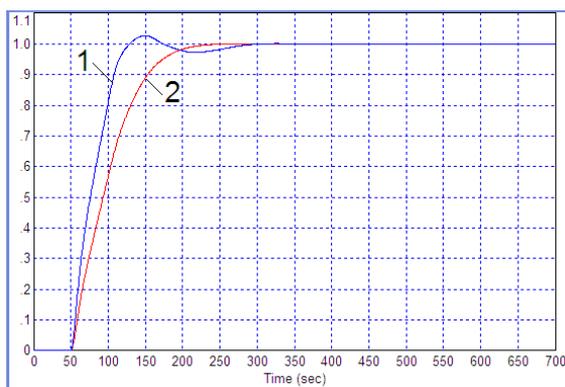


Рис. 11. Процессы в системе с объектом (5) и с рассчитанным для него ПИ-регулятором при $R = 1$ (линия 1), а также с этим же при $R = 8$ (линия 2)

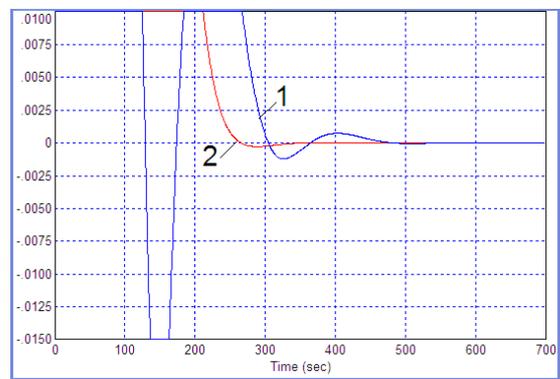


Рис. 12. Графики изменения ошибки управления в тех же условиях, что на Рис. 11

Отличие рассмотренных примеров состоит в том, что в первом случае постоянная времени звена запаздывания не столь сильно превышает сумму постоянных времени фильтров, входящих в модель объекта, а во втором случае она превышает эту величину в пять раз. Следовательно, в том случае, когда влияние переходного процесса, исследуемый метод наиболее эффективен, а в том случае, когда это влияние соизмеримо с влиянием фильтра, этот метод менее эффективен.

6. ОПТИМИЗАЦИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Рассмотрим решение той же задачи средствами ПИД-регулятора, для чего введем соответствующий дифференцирующий тракт в структуру модели системы.

Для объекта с передаточной функцией (1) оптимизация регулятора при $R = 1$ дает следующие коэффициенты регулятора: $K_P = 0,7637$, $K_I = 0,03305$, $K_D = -7,8707$. Этот результат настораживает, поскольку дифференцирующий тракт имеет отрицательный коэффициент.

При $R = 8$ решение этой же задачи дает следующие коэффициенты: $K_P = 0,9147$, $K_I = 0,0323$, $K_D = 3,895$. Этот результат по признаку знака последнего коэффициента видится более адекватным. Переходные процессы двух получаемых систем, то есть систем с двумя видами регуляторов, показаны на Рис. 13. Изменение ошибки в крупном масштабе показано на Рис. 14.

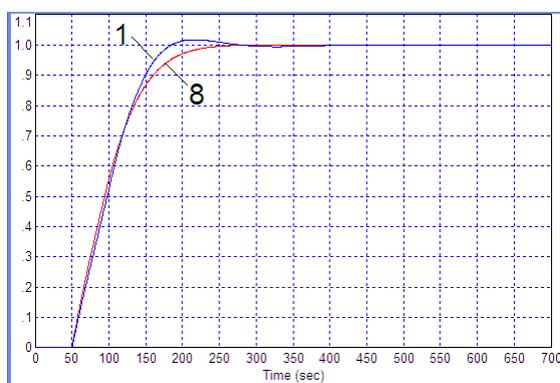


Рис. 13. Процессы в системе с объектом (1) и с рассчитанным для него ПИД-регулятором при $R = 1$ (линия 1), а также с этим же при $R = 8$ (линия 8)

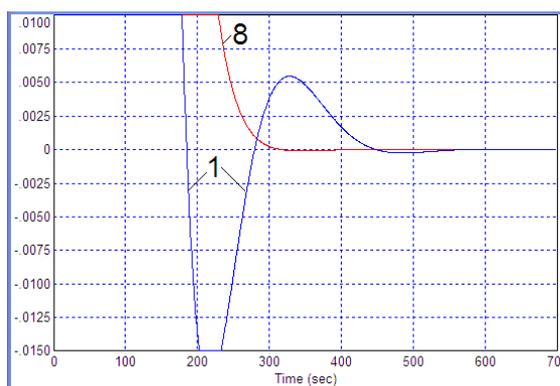


Рис. 14. Графики изменения ошибки управления в тех же условиях, что на Рис. 13

Видно, что по всем показателям второй вариант ПИД-регулятора дает лучшие результаты, поскольку в этом случае перерегулирование пренебрежимо мало, затухание ошибки происходит намного быстрее. Первый вариант сопоставим с лучшим результатом, полученным в статье [3] для этой же задачи с

ПИД-регулятором (см. Рис. 1). Для более детального сопоставления требуется лучшее разрешение на Рис. 1, либо точное значение коэффициентов этого ПИД-регулятора, чего статья [3] не предоставляет.

Оценим эффективность ПИД-регулятора для случая, когда фильтр в передаточной функции объекта имеет больший порядок.

Рассмотрим объект с передаточной функцией

$$W_o = \frac{0,3}{400s^2 + 40s + 1} \exp(-50s). \quad (6)$$

Для объекта с передаточной функцией (6) оптимизация регулятора при $R = 1$ дает следующие коэффициенты регулятора: $K_P = 1,4756$, $K_I = 0,0310$, $K_D = 17,82$. При $R = 8$ решение этой же задачи дает следующие коэффициенты: $K_P = 1,4696$, $K_I = 0,0323$, $K_D = 17,8699$. Переходные процессы двух получаемых систем, то есть систем с двумя видами регуляторов, показаны на Рис. 15. Изменение ошибки в крупном масштабе показано на Рис. 16.

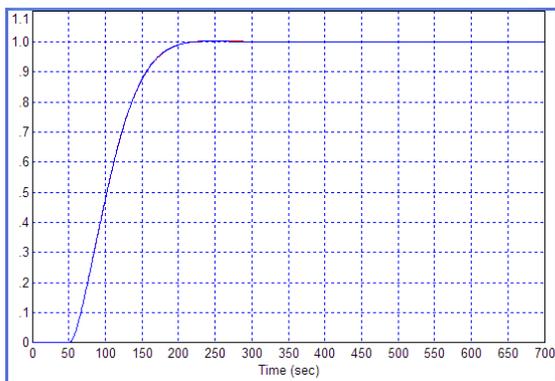


Рис. 15. Процессы в системе с объектом (6) и с рассчитанным для него ПИД-регулятором при $R = 1$ и при $R = 8$, линии сливаются

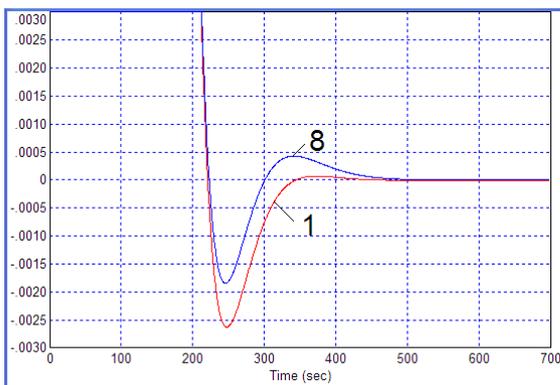


Рис. 16. Графики изменения ошибки управления в системе с объектом (6) и с рассчитанным для него ПИД-регулятором при $R = 1$ (линия 1), а также с этим же при $R = 8$ (линия 8)

Видно, что в целом переходные процессы практически совпадают. Это же можно заметить в отношении полученных коэффициентов

регулятора, которые отличаются крайне незначительно. Во втором случае ошибка затухает несколько быстрее. Можно отметить, что в случае модели вида (6) где влияние параметра фильтра более существенно, дифференцирующий тракт в большей мере полезен, что видно из получаемого значения его коэффициента в сравнении с другими результатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований показано, что метод проектирования регуляторов путем численной оптимизации для объекта, рассмотренного в статье [3], является лучшим, поскольку результаты для ПИ-регулятора лучше самых лучших результатов этой статьи, а худший результат для ПИД-регулятора совпадает с лучшим результатом этой статьи, лучший же результат для этого случая превосходит любой результат, полученный в этой статье. Следовательно, авторы напрасно не рассмотрели указанный метод и не использовали его.

Также показано, что для стоимостной функции, предложенной в общем виде в работе [7] в виде

$$F_C(T) = \int_0^T |e(t)|^M t^R dt, \quad (7)$$

целесообразно выбирать $M = 1$, а значение R брать от 1 до 8. Наиболее эффективно изменение этого коэффициента от 1 до 3, дальнейшее увеличение уже не столь эффективно.

Предложенный метод исследован для измененной модели объекта. Установлено, что увеличенное значение показателя R полезно или нейтрально. Поэтому можно рекомендовать эту модификацию стоимостной функции, по меньшей мере, для рассмотренного класса объектов, представляющих собой последовательное соединение низкочастотного фильтра и звена запаздывания. Это проверено для различных соотношений постоянных времени и для первого и второго порядка фильтров. Дальнейшее повышение порядка фильтра, вероятнее всего, не опровергнет этих результатов, поскольку члены высших порядков полинома в знаменателе фильтра незначительно сказываются в сравнении с первыми двумя-тремя членами и в сравнении с влиянием звена запаздывания, что следует из теории и подтверждено моделированием.

Целесообразно использовать и другие методы повышения эффективности стоимостной (целевой) функции, например, использование детектора правильности движения (детектор роста ошибки) [13]. При реализации регулятора можно воспользоваться идеями статьи [14]. Если требуется робастный

регулятор, целесообразно использовать подход, предложенный в работе [15].

В отношении предложенной авторами классификации методов следует отметить, что «метод оптимального модуля» в результате поиска через систему www.google.ru дает единственный результат полного совпадения этого термина, за исключением статьи [2], а именно – статью тех же авторов со ссылкой на работу [16], найти полный текст этой работы в Интернете не удалось, т. е. этот метод известен лишь локально в рамках научной школы Томского политехнического университета, поэтому ссылку на статью, где изложен этот метод все же целесообразно было бы дать в работе [1], тем более, что этот метод возглавляет представленный список методов решения данной задачи. Аналогичный поиск по запросу «метод апериодической устойчивости» также дает ссылку только на две публикации ТПУ, а именно, на работу [2] и на достаточно невнятную дипломную работу. Тем самым статья [1] фактически утверждает, что только два метода позволяют успешно решить поставленную задачу, причем оба эти метода разработаны в стенах ТПУ, суть этих методов не раскрывается. Полагаем, что такие подходы к написанию научной статьи и к выполнению исследований недопустимы: следует осуществить объективный поиск известных путей решения поставленной задачи и сравнивать эффективность всех найденных методов, а не ограничивать круг местными достижениями, не известными широкой научной общественности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стукач О.В. Десяносто лет отрицательной обратной связи. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 108–113.
- [2] Мишанов М.С., Гладышев И.С., Байдали С.А. Методы расчета регуляторов одноконтурных САУ. Труды XVII Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». Томск. 9 – 13 Апреля 2012 г. С. 396–397. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2011/C01/V02/193.pdf>
- [3] Жмудь В.А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / В.А. Жмудь; Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [4] Жмудь В.А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления / В.А. Жмудь.– Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [5] Жмудь В.А. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim.: учеб. пособие / В.А. Жмудь; Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 124 с.
- [6] В.А. Жмудь. Измерительные устройства автоматизи.: учеб. пособие / В.А. Жмудь; Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – 72 с.
- [7] Жмудь В.А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления / В.А. Жмудь.– Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [8] Жмудь В.А., Заворин А.Н., Ядрышников О.Д. Неаналитические методы расчета ПИД-регуляторов. Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – 40 с.
- [9] Жмудь В.А., Заворин А.Н., Ядрышников О.Д. Дробно-степенные ПИД-регуляторы. Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – 48 с.
- [10] Жмудь В.А., Тайченачев В.А. Системы автоматического управления высшей точности: учеб. пособие, В.А. Жмудь, А.В. Тайченачев; Новосибир. Гос. ун-т – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2016. – 178 с.
- [11] Жмудь, В.А. Моделирование замкнутых систем автоматического управления: учебное пособие для академического бакалавриата / В.А. Жмудь. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 126 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-534-03410-3. URL: <http://urait.ru/catalog/403830>
- [12] Zhmud V.A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. – Novosibirsk: KANT, 2017. – 126 p.
- [13] Жмудь В.А., Ядрышников О. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24-29.
- [14] Васильев В.А., Воевода А.А., Жмудь В.А., Хассуонех В.А. Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 3-10.
- [15] Жмудь В.А., Ядрышников О.Д., Заворин А.Н., Полищук А.В. Анализ метода проектирования робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации. Автоматика и программная инженерия. 2012. № 1 (1). С. 7-16.
- [16] Байдали С.А.. Параметрический синтез двухконтурной каскадной системы автоматического управления / С.А. Байдали, В.Ф. Дядик, Н.С. Криницын // Известия вузов. Физика / Томский гос. университет. – 2010. – Т. 53, № 11/2 (приложение). – С. 197–201.

Reduction of the Dynamic Error of the System Controlling Object with Delay in the Numerical Optimization of the Regulator

A.YU. IVOILOV, H. ROTH, V.A. ZHMUD

Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia,

University of Siegen, Siegen, Germany

Abstract: The paper solves the problem of ensuring the most rapid entering of an error in the automatic control system into zone of an extremely

small error, less than 0.1%. As an example of a control object model, the most commonly encountered type is chosen, represented by the sequential connection of a first-order filter and delay link. The example is taken from a publication that solves the problem of design of regulator, which allowed comparing of the achieved results with those published in this paper. The effect of changing the coefficients and structure of the object is also considered, namely, when the order of the filter is changed twice and when the filter time constants are changed by a factor of two in larger and lower directions. The effectiveness of the proposed solution is shown, which consists in increasing the power of one of the characteristic components of the cost function, which is the time since the beginning of the transient process. This component in the cost function plays the role of the weight coefficient with the error module, which is then integrated to obtain the final value of the goal (cost) function. The results are confirmed by mathematical modeling in the *VisSim* program.

Key words: regulator, control, feedback, error, duration of transient process, control, dynamic error, numerical optimization, simulation, *VisSim*.

REFERENCES

- [1] Stukach O.V. Devjanosto let otricatel'noj obratnoj svyazi. Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet. Tomsk. Avtomatika i programmaja inzhenerija (Automatics & Software Engineering). 2017. № 2 (20). S. 108–113.
- [2] Mishanov M.S., Gladyshev I.S., Bajdali S.A. Metody rascheta reguljatorov odnokonturnyh SAU. Trudy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye tehnika i tehnologii». Tomsk. 9 – 13 Aprelja 2012 g. C. 396–397. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2011/C01/V02/193.pdf>
- [3] Zhmud V.A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / V.A. Zhmud'; Novosib. gos. tehn. un-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 c.
- [4] Zhmud V.A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija / V.A. Zhmud'.– Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s.
- [5] Zhmud V.A. Modelirovanie i chislennaja optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija v programme VisSim.: ucheb. posobie / V.A. Zhmud; Novosib. gos. tehn. un-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2012. – 124 c.
- [6] V.A. Zhmud. Izmeritel'nye ustrojstva avtomatiki.: ucheb. posobie / V.A. Zhmud' ; Novosib. gos. tehn. un-t. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2012. – 72 c.
- [7] Zhmud V.A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija / V.A. Zhmud'.– Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s.
- [8] Zhmud V.A., Zavorin A.N., Jadryshnikov O.D. Neanaliticheskie metody rascheta PID-reguljatorov. Novosib. gos. tehn. un-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2013. – 40 c.
- [9] Zhmud V.A., Zavorin A.N., Jadryshnikov O.D. Drobno-stepennye PID-reguljatory. Novosib. gos. tehn. un-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2013. – 48 c.
- [10] Zhmud V.A., Tajchenachev V.A. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija vysshej tochnosti: ucheb. posobie, V.A. Zhmud', A.V. Tajchenachev; Novosib. Gos. un-t – Novosibirsk: IPC NGU, 2016. – 178 s.
- [11] Zhmud, V.A. Modelirovanie zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija: uchebnoe posobie dlja akademicheskogo bakalavriata / V.A. Zhmud'. – 2-e izd., ispr. i dop. – M.: Izdatel'stvo Jurajt, 2017. – 126 s. – (Bakalavr. Akademicheskij kurs). – ISBN 978-5-534-03410-3. URL: <http://urait.ru/catalog/403830>
- [12] Zhmud V.A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. – Novosibirsk: KANT, 2017. – 126 p.
- [13] Zhmud' V.A., Jadryshnikov O. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). S. 24-29.
- [14] Vasil'ev V.A., Voevoda A.A., Zhmud' V.A., Hassuoneh V.A. Cifrovye reguljatory: celevye funkcii nastrojki, vybor metoda integrirovaniya, apparatnaja realizacija. Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2006. № 4. S. 3-10.
- [15] Zhmud V.A., Jadryshnikov O.D., Zavorin A.N., Polishhuk A.V. Analiz metoda proektirovaniya robnostnogo reguljatora metodom dvojnoj iterativnoj parallel'noj chislennoj optimizacii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2012. № 1 (1). S. 7-16.
- [16] Bajdali S.A.. Parametricheskij sintez dvuhkonturnoj kaskadnoj sistemy avtomaticheskogo upravlenija / S.A. Bajdali, V.F. Djadik, N.S. Krinicyn // Izvestija vuzov. Fizika / Tomskij gos. universitet. – 2010. – T. 53, № 11/2 (prilozhenie). – S. 197–201.



Андрей Юрьевич Ивойлов - аспирант кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: iau13hv@mail.ru



Hubert Roth – Head of the Department of Automatic Control Engineering of University of Siegen, Professor, Doctor of Sci., Germany

E-mail: hubert.roth@uni-siegen.de



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.

E-mail: oao_nips@bk.ru