

Проектирование робастных энергосберегающих регуляторов

В.А. Жмудь

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», 630073, Новосибирск

Аннотация: В статье рассматривается метод проектирования регулятора для объекта, содержащего, помимо прочего, один или более последовательно соединенных интеграторов, который обеспечивает устойчивое астатическое управление с малым перерегулированием и минимумом потребления управляющего ресурса, заданного в виде квадрата управляющего воздействия. Метод апробирован моделированием на нескольких примерах.

Ключевые слова: численная оптимизация, энергосбережение, регуляторы, автоматика, моделирование, динамические системы, точность управления

ВВЕДЕНИЕ

Отрицательная обратная связь с последовательным регулятором позволяют успешно управлять объектами, обеспечивая требуемые значения их выходных величин даже при наличии возмущающих воздействий. Такие контуры управления широко применяются в науке и технике. Успешность такого управления определяется правильностью проектирования регулятора в зависимости от модели объекта и частично от условий его действия (то есть от целей управления). Вследствие сложности аналитического расчета параметров регулятора, для этих целей зачастую более успешно может быть применен метод численной оптимизации [1].

Практически всегда модель регулятора известна лишь в ограниченном сверхдиапазоне частот. Это может служить причиной того, что свойства реальной системы разительно отличаются от результата предварительного моделирования. Нами предложены различные методы для более эффективного решения задачи оптимизации регулятора с учетом этой особенности, одна из которых состоит во внесении в модель объекта дополнительного звена запаздывания. Это позволяет рассчитывать такой регулятор, который обеспечит устойчивость системы даже в том случае, если модель объекта в худшую сторону отличается от той, которая использовалась при численной оптимизации регулятора для него. Такими отличиями могут быть наличие неучтенного элемента запаздывания или (и) наличие неучтенного фильтра верхних частот.

Зачастую при проектировании систем необходима экономия ресурса управления, который, например, может быть описан квадратом управляющего воздействия [2–3]. Для решения этой задачи с учетом оговоренных особенностей в данной статье предлагается модифицированный метод численной оптимизации на основе программ для моделирования с применением специально вводимых критериев оптимальности и искусственного ухудшения высокочастотной части модели объекта.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Мы будем рассматривать только одноконтурные системы с отрицательной единичной обратной связью, упрощенная структурная схема которых показана на рис. 1 [1]. Этот контур включает объект, регулятор и элемент сравнения. Здесь выходная величина $Y(t)$, которая должна быть по возможности как можно более близка к заданию $V(t)$. Ошибка управления $E(t)$ равна разности этих величин; регулятор преобразует эту ошибку $E(t)$ в управляющий сигнал $U(t)$, который, воздействует на вход объекта для того, чтобы его выходная величина сравнялась с заданием. В итоге регулятор при работе в контуре с обратной связью снижает ошибку $E(t)$ до нуля.

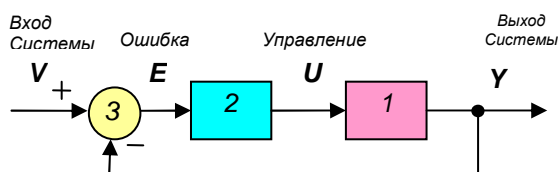


Рис. 1. Структурная схема простейшей системы с отрицательной обратной связью: 1 – объект, 2 – регулятор, 3 – элемент сравнения

Численные методы оптимизации позволяют моделировать всю систему в целом, изменяя параметры регулятора (при заданной его структуре). В результате отыскиваются такие параметры, которые дают минимальное значение положительно-определенной стоимостной функции, которая является критерием оптимальности. Стоимостная функция в качестве аргументов использует сигналы в системе, например, интеграл от модуля ошибки. Усложнения стоимостной функции позволяют скорректировать процесс

оптимизации, например, устранить перерегулирование или периодические колебания выходного сигнала около установившегося равновесного значения. Некоторые изменения стоимостной функции позволяют успешно выполнить оптимизацию регулятора в тех случаях, когда без таких изменений процедура оптимизации не может быть успешно завершена, например, вследствие неограниченного возрастания одного из сигналов в системе.

Одноконтурной системой в данном случае мы называем такую систему, в которой отсутствуют связи из каких-либо точек модели объекта или в какие-либо точки этой модели. При этом регулятор может быть реализован любыми структурами с любыми петлями непосредственно в самом регуляторе, в этом случае система не перестает быть одноконтурной, поскольку в ней имеет место последовательное соединение регулятора, объекта и элемента сравнения в единую замкнутую петлю.

Наиболее эффективно энергосбережение в том случае, когда в модели объекта содержится интегрирующее звено.

Хотя наиболее эффективными регуляторами, как правило, считаются ПИД-регуляторы (то есть регуляторы, содержащие пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий тракты), при наличии в объекте интегратора, в регуляторе интегратор не нужен. Поэтому мы будем рассматривать задачу проектирования ПД-регуляторов (содержащих только пропорциональный и дифференцирующий тракты).

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Предлагаются следующие принципы проектирования энергосберегающих регуляторов.

1. Хотя ранее в большинстве задач мы рекомендовали в качестве стоимостной функции интеграл от модуля ошибки, умноженного на время с начала переходного процесса, при проектировании энергосберегающих регуляторов предлагается указанный множитель устранить, оставив лишь интеграл от модуля ошибки. Причиной этому служат два соображения: указанный коэффициент служит для снижения перерегулирования и (или) колебаний в переходном процессе, но это не требуется при введении в целевую функцию членов, обеспечивающих энергосбережение.

2. Поскольку в большинстве задач энергосберегающих регуляторов начальный ход переходного процесса не критичен, целесообразно отсекают этот начальный этап, начиная интегрирование с некоторого наперед заданного времени от его начала.

3. В стоимостную функцию предлагается внести с весовым коэффициентом член, равный интегралу от квадрата сигнала управления, прикладываемого к объекту [4].

4. Предлагается в структуру модели объекта можно ввести звено запаздывания. В этом звене запаздывания величину запаздывания следует выбирать такой, чтобы существенный фазовый сдвиг возникал в той области частот, в которой амплитудно-частотная характеристика объекта определена при идентификации не достаточно точно. При этом следует обеспечить малое влияние этого запаздывания на фазовую характеристику модели объекта в той области, где модель объекта определена с достаточной степенью точности. Такое искусственное ухудшение быстродействия модели объекта позволяет эффективно достичь поставленной цели, даже если реальный объект обладает какими-нибудь особенностями в области указанных частот, где модель объекта определена недостаточно точно. Полезность такого подхода подтверждена моделированием.

5. В качестве программы для моделирования предлагается программа *VisSim*, которая хорошо себя зарекомендовала для решения задач именно такого класса.

6. В качестве тестовых сигналов в случае линейного объекта можно использовать единичное ступенчатое воздействие. Нелинейные объекты в данной статье не рассматриваются.

3. ТРИ СЛАГАЕМЫХ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Стоимостная функция предлагается в виде трех слагаемых:

$$\Psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3, \quad (1)$$

Первое слагаемое представляет собой интеграл от модуля ошибки от t_1 до T :

$$\psi_1 = \int_{t_1}^T |e(t)| dt, \quad (2)$$

Здесь T – время до достижения задачи управления, t_1 – заданное время, до наступления которого вид переходного процесса не критичен. При моделировании удобнее использовать следующую форму этого слагаемого:

$$\psi_1 = \int_0^T |e(t)| \sigma(t - t_1) dt, \quad (3)$$

Здесь $\sigma(t - t_1)$ – функция скачка из нуля в единицу в момент t_1 .

Второе слагаемое определяет энергозатраты как интеграл от квадрата управляющего

воздействия с весовым коэффициентом:

$$\psi_2 = \int_0^T k_2 u^2(t) dt, \quad (4)$$

Здесь коэффициент k_2 необходим для приведения всех «затрат» к единой шкале. Такой коэффициент необходим при всех слагаемых кроме одного, поскольку умножение стоимостной функции в целом на постоянный коэффициент не изменяет его действия, поэтому для простоты предлагается первый коэффициент в соотношении (3) положить единичным: $k_1 = 1$.

Третье слагаемое – модуль производной от ошибки управления в заданный момент времени или интеграл от этого модуля производной на заданном интервале времени:

$$\psi_3 = \left| \frac{d}{dt} e(t_1) \right|, \quad (5)$$

$$\psi_1 = \int_{t_3}^T \left| \frac{d}{dt} e(t) \right| dt. \quad (6)$$

4. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Рассмотрим объект с передаточной функцией вида:

$$W(s) = \frac{1}{s^2(4s^2 + 4s + 1)} \cdot W_x(s). \quad (7)$$

Здесь $W_x(s)$ – неизвестная компонента передаточной функции объекта.

Например, это может быть звено запаздывания, допустим, на величину $\tau = 2$ с:

$$W_x(s) = \exp\{-2s\}. \quad (8)$$

Также это может быть фильтр высоких частот:

$$W_x(s) = \frac{1}{(0.3s + 1)(0.3s + 1)}. \quad (9)$$

Предположим, по технологии применения объекта требуется сбережение ресурса управления при достижении цели управления к моменту времени $t_1 = 50$ с.

Предлагается осуществлять оптимизацию ПД-регулятора с целевой функцией вида (1) при слагаемых (3), (4), (5). Тогда уравнение регулятора принимает вид:

$$W_R(s) = k_P + k_D s. \quad (10)$$

На Рис. 2 показана схема в программе VisSim для оптимизации регулятора (10).

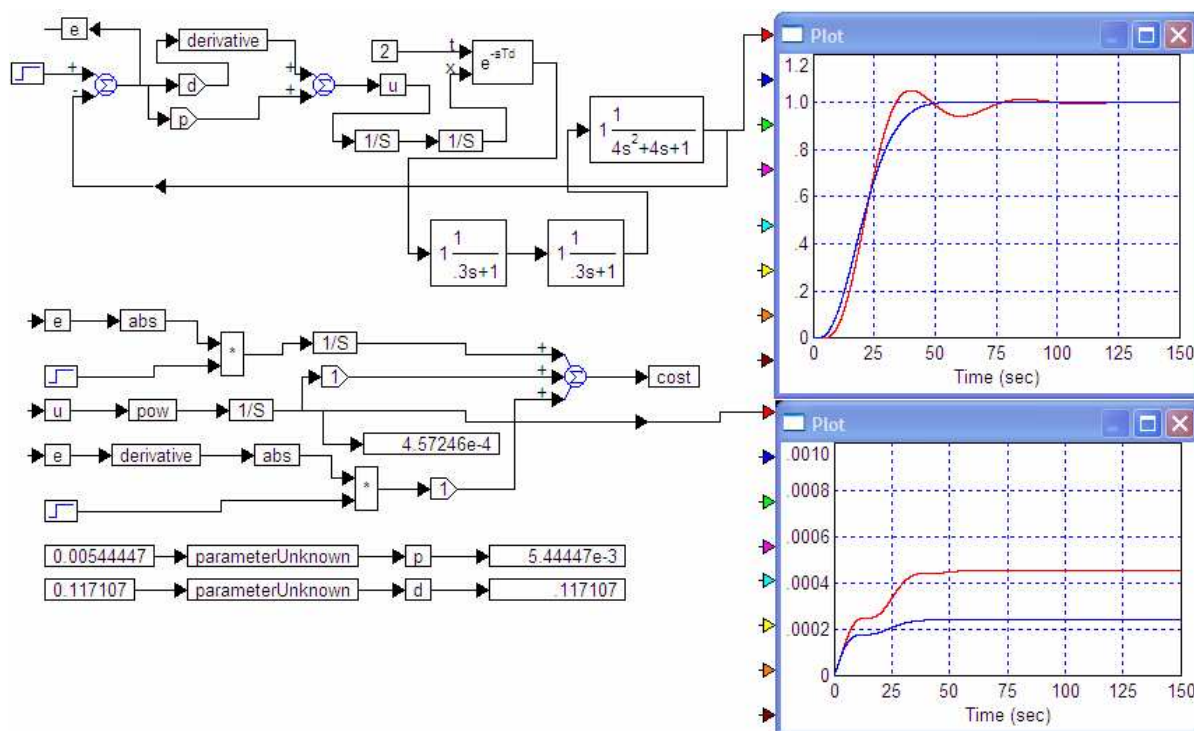


Рис. 2. Схема в программе VisSim для оптимизации регулятора (10) и для исследования результата оптимизации: при оптимизации элемент запаздывания и два фильтра из контура исключены

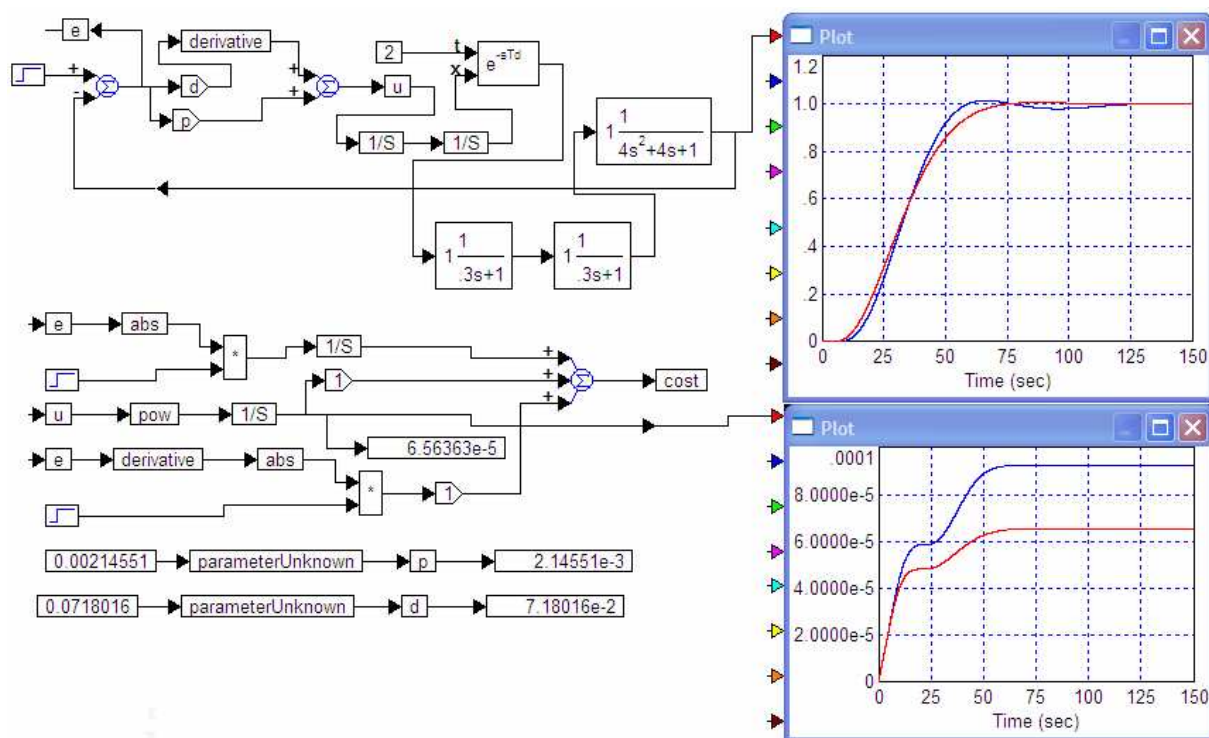


Рис. 3. Схема в программе VisSim для оптимизации регулятора (10) и для исследования результата оптимизации: при оптимизации элемент запаздывания настроен на значение $\tau = 2$ с, а два фильтра из контура исключены

Поскольку функция $W_x(s)$ неизвестна, оптимизация, как вариант, может осуществляться с моделью, не содержащей эту функцию. В этом случае предлагаемая процедура дает следующие коэффициенты: $k_P = 0,005444$; $k_D = 0,1171$. Затраты энергии при этом составляют $P = 0,00024$ единицы. Переходный процесс не имеет перерегулирования. Отметим, что если постоянную времени увеличить до значения $\tau = 2,2$ с, то в системе нарушается устойчивость.

Далее мы можем осуществить моделирование системы с объектом, в котором содержится эта передаточная функция в виде произведения функций (8) и (9). В этом случае получим другие графики, которые показаны на Рис. 2 красной линией. В этом случае в системе возникает перерегулирование около 2 %, энергозатраты возрастают до величины $P = 0,00045$ единиц.

Модифицированная процедура состоит в оптимизации при введении в модель звена запаздывания с постоянной времени $\tau = 2$ с (фильтры исключены). Эта процедура дает следующие коэффициенты: $k_P = 0,0021455$; $k_D = 0,0718$. Затраты энергии при этом составляют $P = 8,3 \cdot 10^{-5}$ единиц. Переходный процесс имеет пренебрежимо малое перерегулирование менее 1 %, его вид показан на рис.3 синей линией. Если совместно с звеном запаздывания применить фильтр, переходный процесс изменяется несущественно,

а затраты энергии даже уменьшаются до величины $P = 6,5 \cdot 10^{-5}$ единиц, как показано красной линией на Рис. 3.

5. УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ С ТРЕМЯ ИНТЕГРАТОРАМИ

Рассмотрим объект с передаточной функцией вида:

$$W(s) = \frac{1}{s^3} \cdot W_x(s). \quad (11)$$

Задача управления таким объектом не может быть эффективно решена простым ПД-регулятором. Поэтому в структуру введем дополнительный канал дифференцирования, включенный на выходе первого дифференцирующего звена. Получаем регулятор с двойным дифференцированием, наряду с однократным. Такие регуляторы в различной литературе сокращенно называются ПДД-регуляторами или ПД²-регуляторами. Передаточная функция такого регулятора имеет вид

$$W_R(s) = k_P + k_D s + k_{DD} s^2. \quad (12)$$

Результат оптимизации и схема показаны на Рис. 4. На Рис. 5 показаны результаты оптимизации при введении в модель объекта звена запаздывания с постоянной времени 2 с.

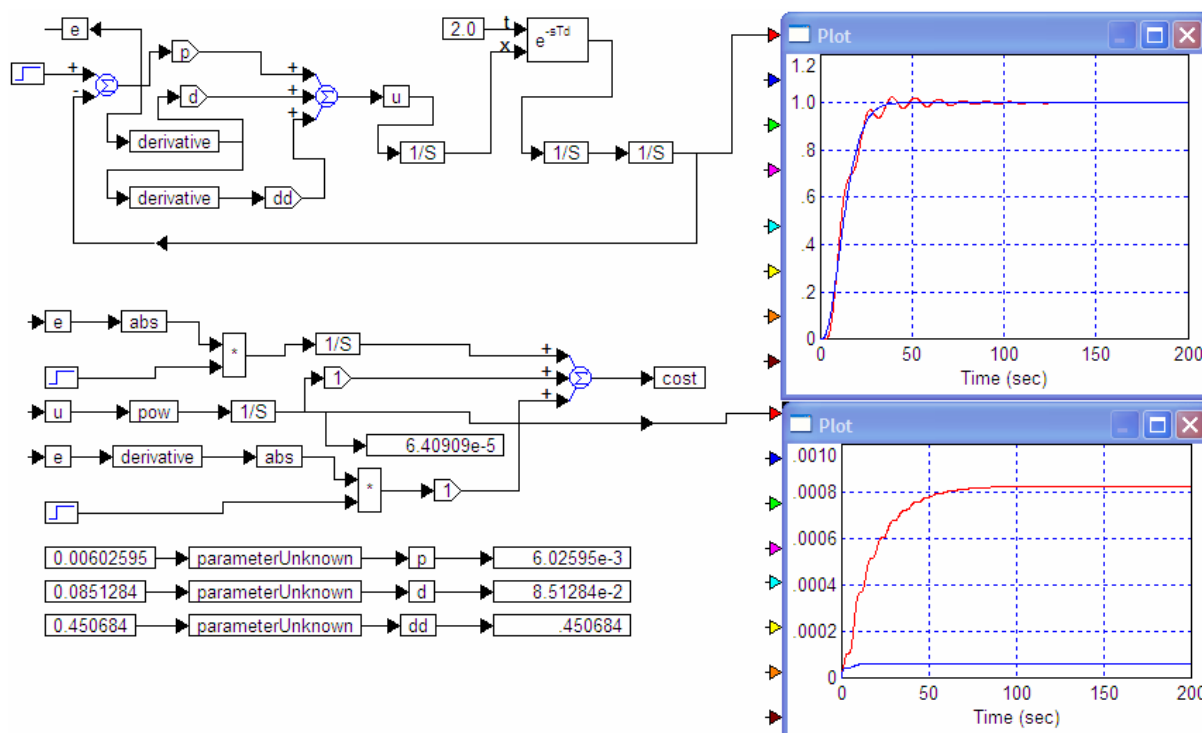


Рис. 4. Схема и результат оптимизации регулятора для объекта (11) и для исследования результата оптимизации: при оптимизации элемент запаздывания исключен, результат – синий график, результат с звеном запаздывания – красный график

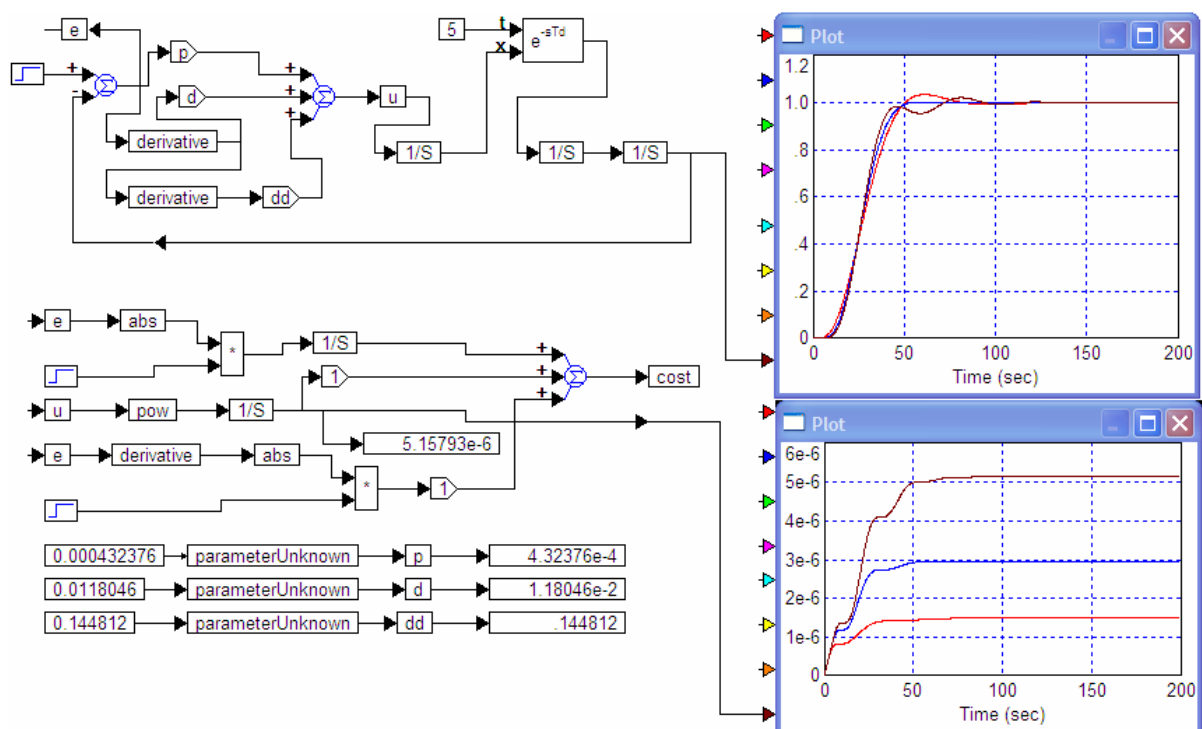


Рис. 5. Схема и результат оптимизации регулятора для объекта (11) и для исследования результата оптимизации: при оптимизации элемент запаздывания включен, результат – синий график, результат без звена запаздывания – красный график, результат со звеном запаздывания с увеличенным запаздыванием до величины 5 с – черный график

При оптимизации объекта без звена запаздывания получаем следующие коэффициенты регулятора: $k_p = 0,006025$; $k_D = 0,0851$; $k_{DD} = 0,45068$. Переходный процесс не имеет перерегулирования, затраты энергии

$P = 8 \cdot 10^{-4}$ единиц. При введении звена запаздывания с $\tau = 2$ с получаем переходный процесс с небольшими затухающими колебаниями (красная линия на Рис. 4), затраты энергии возрастают в 10 раз. Если постоянную

времени увеличить до значения $\tau = 2,2$ с или более, то в системе нарушается устойчивость.

Получены коэффициенты регулятора: $k_P = 0,000432$; $k_D = 0,0118$; $k_{DD} = 0,144$. Затраты энергии при $\tau = 2$ с составляют $P = 3 \cdot 10^{-6}$ единиц. Если убрать звено запаздывания, затраты энергии снижаются вдвое. Но даже если постоянную времени звена запаздывания увеличить до $\tau = 5$ с, то устойчивость в системе сохраняется, затраты энергии растут до $P = 5,2 \cdot 10^{-6}$ единиц.

6. УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ С ЧЕТЫРЬМЯ ИНТЕГРАТОРАМИ

Рассмотрим объект с передаточной функцией вида:

$$W(s) = \frac{1}{s^4} \cdot W_x(s). \quad (13)$$

Для такого объекта недостаточно двойного дифференцирования, регулятор вида (12) не может обеспечить устойчивого управления.

Предлагается виртуально охватить один из интеграторов отрицательной обратной связью, как предложено в статье [5].

В этом случае передаточная функция

регулятора принимает следующий вид:

$$W_R(s) = (k_P + k_D s + k_{DD} s^2) \frac{1}{1 + 2/s}. \quad (14)$$

Эту передаточную функцию можно преобразовать к следующему виду:

$$W_R(s) = (k_P + k_D s + k_{DD} s^2) \frac{0,5s}{0,5s + 1}. \quad (15)$$

На *Рис. 6* показаны результаты оптимизации регулятора вида (14) или (15) для объекта (13) при использовании модели без добавочного элемента запаздывания. Значения коэффициентов регулятора: $k_P = 0,000572$; $k_D = 0,09866$; $k_{DD} = 0,660$. Переходный процесс не обладает перерегулированием. Затраты энергии $P = 1,25 \cdot 10^{-5}$ единиц. При введении звена запаздывания в объект он также сохраняет свою устойчивость лишь при малых значениях его постоянной времени, начиная с величины около $\tau = 2,2$ с устойчивость в системе нарушается. При $\tau = 2$ с в переходном процессе имеются колебания, как показано на *Рис. 7* (красная линия). При этом затраты энергии возрастают вдвое, как показано на *Рис. 8*.

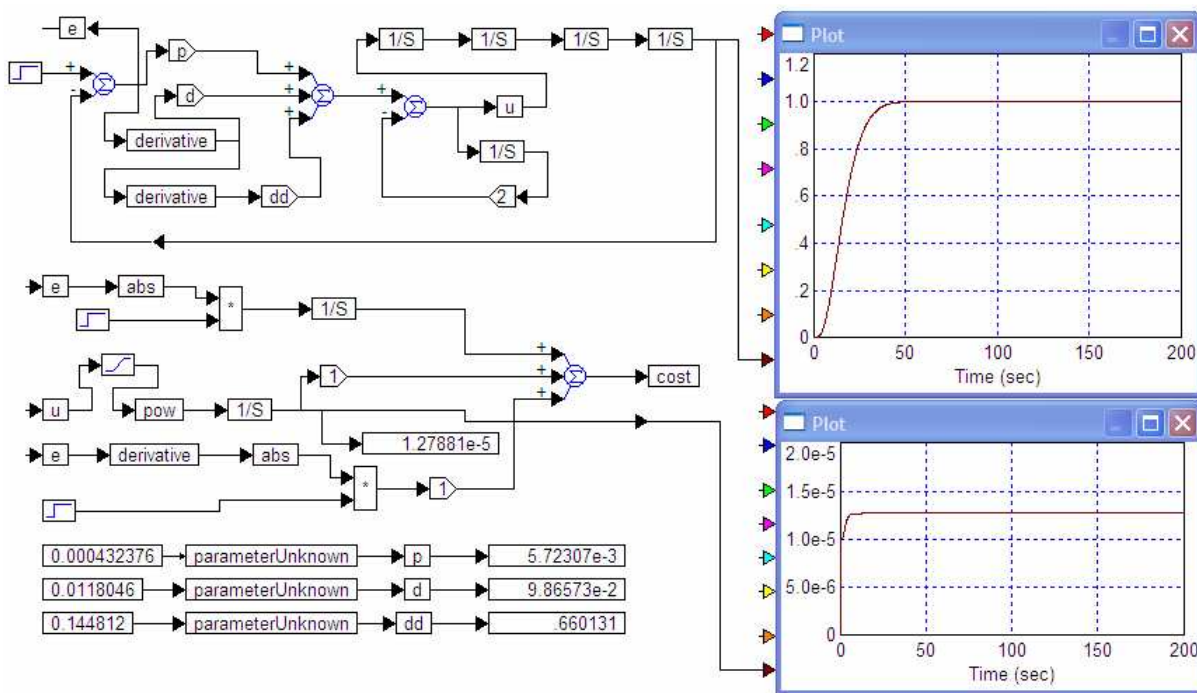


Рис. 6. Схема и результат оптимизации регулятора для объекта (13) и для исследования результата оптимизации: при оптимизации элемент запаздывания исключен

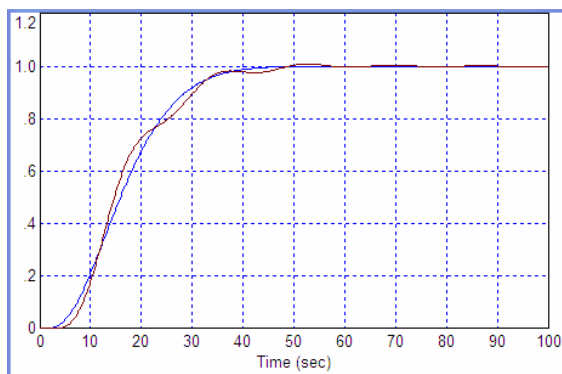


Рис. 7. Результат оптимизации регулятора для объекта (11): при оптимизации элемент запаздывания исключен, результат – синий график, результат с звеном запаздывания – красный график

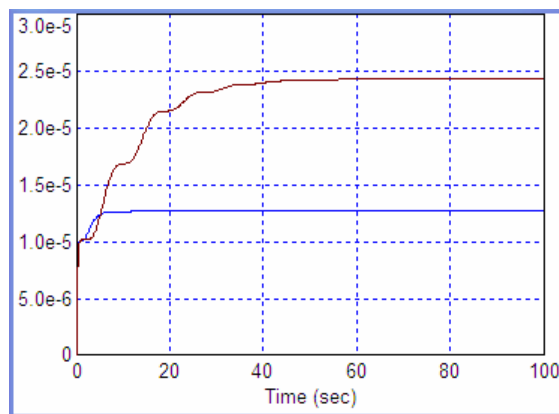


Рис. 8. Графики энергетических затрат, парные к графикам переходных процессов на Рис. 8

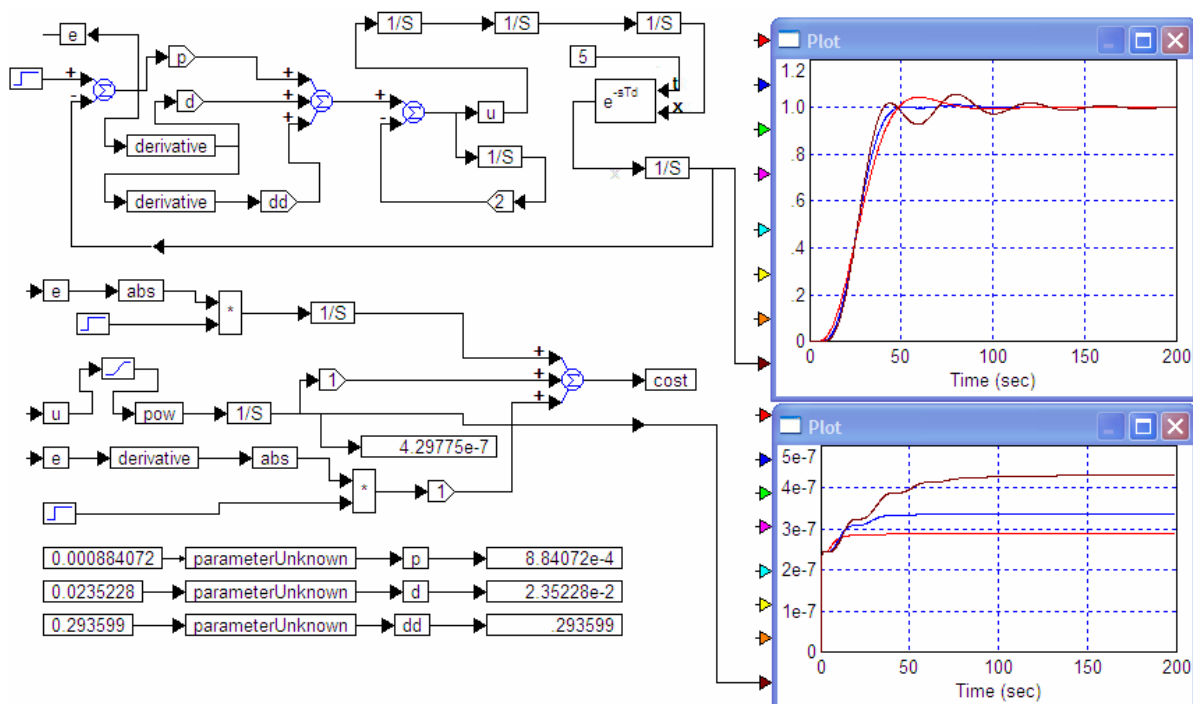


Рис. 9. Схема и результат оптимизации регулятора для объекта (13) при использовании в модели объекта звена запаздывания с постоянной времени 2 с

На Рис. 9 показаны результаты оптимизации регулятора вида (14) или (15) для объекта (13) при использовании модели с добавочным элементом запаздывания с постоянной времени $\tau = 2$ с. Значения коэффициентов регулятора: $k_p = 0,000884$; $k_D = 0,0235$; $k_{DD} = 0,2936$. Переходный процесс не обладает перерегулированием. Затраты энергии $P = 3,4 \cdot 10^{-7}$ единиц.

Если звено запаздывания убрать, затраты энергии снижаются до $P = 2,9 \cdot 10^{-7}$ единиц, а в переходном процессе появляется небольшое перерегулирование около 2%. При увеличении постоянной времени звена запаздывания до $\tau = 5$ с устойчивость в системе сохраняется, в переходном процессе возникает несколько колебаний на величину около 2%.

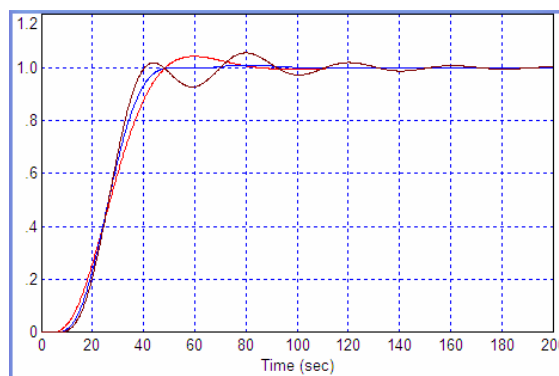


Рис. 10. Результат оптимизации регулятора для объекта (13): при оптимизации элемент запаздывания исключен, результат – синий график, результат без звена запаздывания – красный, результат с звеном запаздывания в 2,5 раза большим – черный график

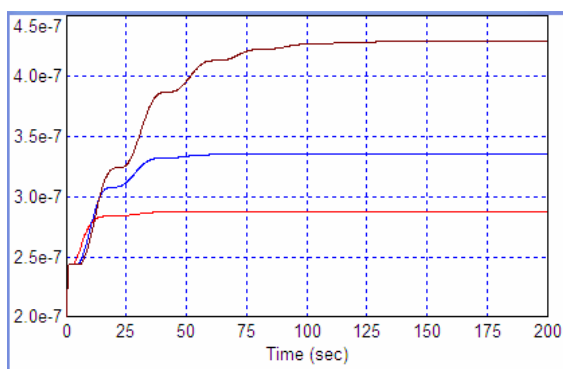


Рис. 11. Графики энергетических затрат, парные к графикам переходных процессов на Рис. 10

Затраты энергии возрастают до $P = 4,25 \cdot 10^{-7}$ единиц. Соответствующие переходные процессы показаны на Рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод проектирования регуляторов исследован моделированием на множестве примеров. Этот метод обеспечивает экономию энергии, когда показателем затрат энергии при этом считается интеграл от управляющего воздействия. Также апробирована эффективность ранее предложенной модификации объекта при оптимизации. Такая модификация обеспечивает более надежное получение полезного результата, поскольку при этом последовательно с моделью объекта включается звено запаздывания. Если при идентификации объекта высокочастотная часть его передаточной функции определена не достаточно точно, такая модификация модели при оптимизации служит эффективным средством достижения применимости полученного результата к реальному объекту. Система с реальным объектом (в котором присутствуют неучтенные высокочастотные корни в форме последовательного фильтра) остается устойчивой, с небольшим перерегулированием.

Применение предлагаемого способа позволяет существенно сократить энергетические затраты на управление и обеспечить более надежное достижение цели управления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / В. А. Жмудь; Новосиб.

гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.

- [2] Соболев А. В., Вент Д. П. Энергосберегающие регуляторы: задачи и структура. Датчики и системы. 2009. № 10. с.23 – 29.
- [3] Жмудь В.А., Касторный А.В. Концепция энергосберегающих регуляторов Автоматика и программная инженерия. 2013. № 4 (6). С. 14–21. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- [4] 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.
- [5] В.А. Жмудь. Регуляторы с псевдо-локальными обратными связями (ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия) Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2 (8). С. 49–57.



Жмудь Вадим Аркадьевич – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор 200 научных публикаций, включая 15 учебных пособий, 2 монографии, более 30 патентов и зарегистрированных программных продуктов. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, измерительная техника.
E-mail: oao_nips@bk.ru

Design of Robust Energy-Saving Regulators

V. A. ZHMUD

Abstract: The paper discusses the method of design of regulators for object, containing one or several consecutive integrators in addition to other elements. The method provides stable astatic control with small overshooting and minimal power consumption, which is specified as square of controlling signal. The method has been tested upon several examples.

Key words: Numerical optimization, energy saving, regulators, automatics, modeling, dynamic systems, accuracy of control.