

Обоснование применения сигналов сложной формы при численной оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления

Вадим А. Жмудь¹, Любомир В. Димитров²

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

Аннотация: В предыдущей работе [1] рассмотрена проблема проектирования регулятора, обеспечивающего астатизм второго порядка. Показано, что если при численной оптимизации регулятора использовать в качестве тестовых сигналов ступенчатые скачки, то получаемая система неудовлетворительно обрабатывает линейно нарастающие сигналы, и наоборот, если использовать линейно нарастающие сигналы, получаемая система неудовлетворительно обрабатывает ступенчатые скачки. В работе предложен метод оптимизации с использованием двух параллельно работающих моделей систем с различными входными сигналами (ступенчатым и линейно нарастающим). Показано, что замена усреднения по времени не всегда приводит к требуемому результату, хотя этот метод в принципе работоспособен. Все же указанная замена была бы крайне полезной, если бы это было возможно и целесообразно, поскольку это позволило бы упростить схему моделирования за счет увеличения времени моделирования. Сложность схемы может оказаться решающим фактором, сдерживающим применение метода, поскольку программное обеспечение всегда обладает лишь ограниченными возможностями по одновременной реализации моделирования и оптимизации сложных структур со многими элементами и многими связями. Ограничение на время моделирования не столь критично, поскольку это всего лишь увеличивает время эксперимента по оптимизации регулятора. Если поставленная задача актуальна, то вероятно, что резерв времени на ее расчет отыскать намного проще, чем перейти на другое программное обеспечение и даже на более новую версию ранее используемого программного обеспечения. В данной статье исследуется возможность такой замены усреднения по множеству на усреднение по времени.

Ключевые слова: управление, замкнутые контуры, регуляторы, проектирование управляющих систем, цифровое управление, обратная связь, оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассмотрена проблема управления объектами с астатизмом второго порядка. Отмечено, что численная оптимизация для расчета коэффициентов в этом случае характеризуется специфической особенностью. Эта особенность состоит в том, что если оптимизация делается при использовании линейно нарастающего сигнала, то полученная

система характеризуется недостаточно высоким качеством при обработке ступенчатого скачка. Это проявляется в большом перерегулировании, в частности, в рассмотренном примере оно составляет 180%. Если же система оптимизируется по отклику на ступенчатое воздействие, то полученная система плохо обрабатывает линейно нарастающее воздействие, что сказывается в существенной статической ошибке.

В этой же статье исследована возможность оптимизации системы в том случае, когда на вход системы подается сумма ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия. Несмотря на то, что система линейна, оптимизация по сумме откликов двух систем дает не такие же результаты, как оптимизация по отклику системы на сумму указанных воздействий. Также оптимизация по сумме воздействий дает не такие результаты, как оптимизация по разности этих воздействий.

В научных исследованиях часто усреднение по множеству заменяют усреднением по времени. Эта концепция на практике позволяет существенно экономить объем аппаратной части экспериментальной установки, хотя и увеличивает длительность эксперимента. Если такой подход плодотворен при оптимизации, это потенциально могло бы упростить используемую модель для оптимизации за счет увеличения времени моделирования (и оптимизации).

Кроме того, такой подход может оказаться крайне эффективным для проектирования робастных регуляторов. Действительно, изменения модели объекта в ходе моделирования и оптимизации может оказаться структурно более простым, чем параллельное моделирование нескольких систем.

В данной статье исследуется возможность такой замены путем моделирования и оптимизации в программе *VisSim*.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Пусть объект задан передаточной функцией. Требуется рассчитать регулятор, обеспечивающий качественную обработку не только ступенчатого скачка, но 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.

Для управления объектом ПИ²Д-регулятор, то есть регулятор, содержащий помимо пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего тракта также тракт с двойным инеторатором.

Предлагается численная оптимизация с помощью средств моделирования и оптимизации VisSim. Простейшая стоимостная функция для оптимизации имеет следующий вид [2–8]:

$$\Psi(T, e) = \Psi_1(T, e) + K_w \Psi_2(T, e). \quad (1)$$

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

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

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

коэффициент.

В частности, для показательного сравнения, целесообразно задать объект в виде следующей модели, исследованной в статье [1]:

$$W(s) = \frac{\exp(-10s)}{(s+1)(s^2+0.01s+1)}. \quad (4)$$

Модель объекта в программе VisSim показана на *рис. 1*, модель регулятора показана на *рис. 2*, модель всей системы показана на *рис. 3*.

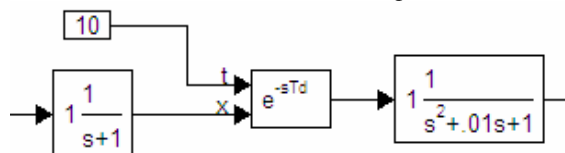


Рис. 1. Модель объекта управления

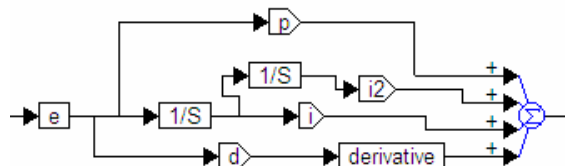


Рис. 2. Модель регулятора в системе управления

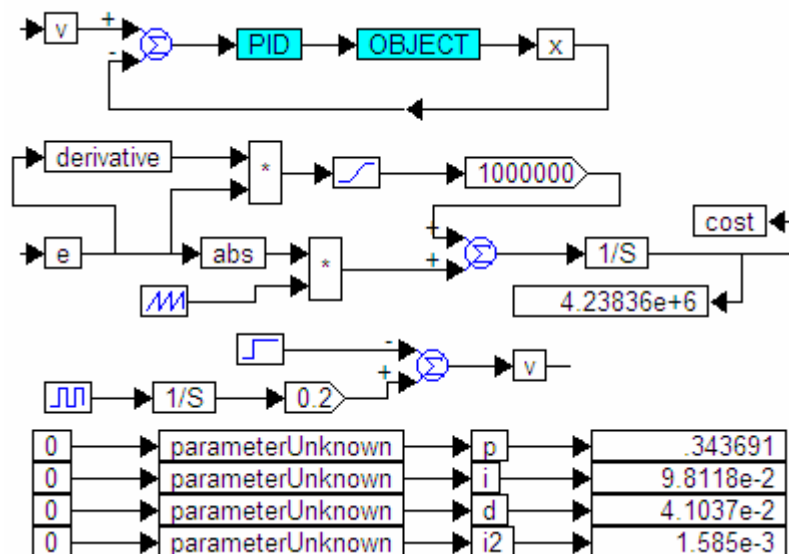


Рис. 3. Модель структуры для оптимизации регулятора в системе

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для отыскания компромиссного решения первоначально использовалась такая же структура модели, как в работе [1]. При этом вместо параллельного моделирования двух систем или параллельной подаче на одну систему двух воздействий, ступенчатого и линейно нарастающего, использовалась модель единственной системы. На ее вход подавались сдвинутые во времени два воздействия: ступенчатое (скачок в отрицательном направлении) и линейно нарастающее. При этом

использовался такой же весовой коэффициент, как в работе [1], а именно: $K_w = 20000$ и более. Увеличение этого коэффициента снижает перерегулирование в ответ на ступенчатый скачок, но увеличение статической ошибки при обработке линейно нарастающего воздействия. Пример полученного результата показан на *рис. 4*. Этот результат имеет три признака неудовлетворительного качества. В отклике на ступенчатый фрагмент скачка имеется нарастающая во времени ошибка (рост отклонения сигнала от предписанного уровня, равного минус единице). В отклике на линейно

нарастающий сигнал также видно нарастание ошибки по мере развития процесса. Также коэффициент второго интегратора отрицателен, хотя и мал по величине. Эти три признака указывают на то, что данный результат нельзя принять.

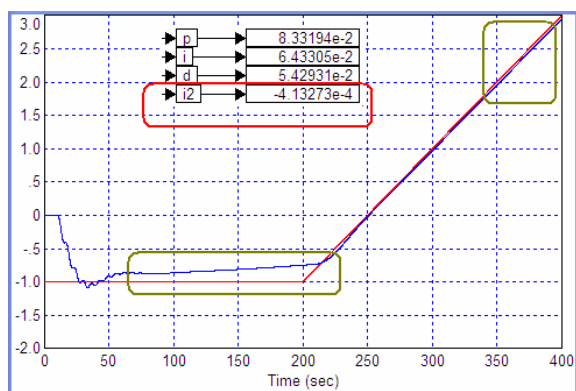


Рис. 4. Результат оптимизации регулятора по структуре рис. 3

Для решения этой проблемы увеличим в десять раз наклон линейно нарастающей части входного сигнала. Для этого множитель в формирователе линейно нарастающего сигнала увеличим до значения 0,2. Ранее он был взят равным 0,02 для получения такого же наклона, как в статье [1]. Для того чтобы сравнить полученный результат с предыдущим, сохраним полученные коэффициенты и осуществим простое моделирование (без оптимизации) при том же наклоне, какой был в первом варианте. Полученный график показан на рис. 5. Этот результат удовлетворителен. Все коэффициенты

положительны, ошибка в каждом случае асимптотически стремится к нулю. Тем не менее, в отклике на ступенчатый скачок присутствуют высокочастотные колебания, которые затухают недостаточно быстро.

Для дальнейших исследований используем существенно меньший весовой коэффициент, а именно: $K_w = 100$. Результат оптимизации показан на рис. 6. Значения полученных коэффициентов регулятора показаны на врезке к графику. Данные процессы можно считать хорошими: перерегулирование менее 15 %, высокочастотные колебания слабы и быстро затухают, статическая ошибка равна нулю, статическая ошибка второго порядка (ошибка при линейном нарастании входного сигнала) также равна нулю.

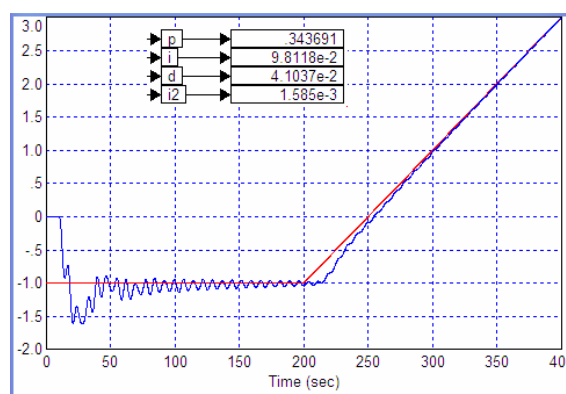


Рис. 5. Результат оптимизации регулятора по структуре рис. 3 с уточненными параметрами входных сигналов

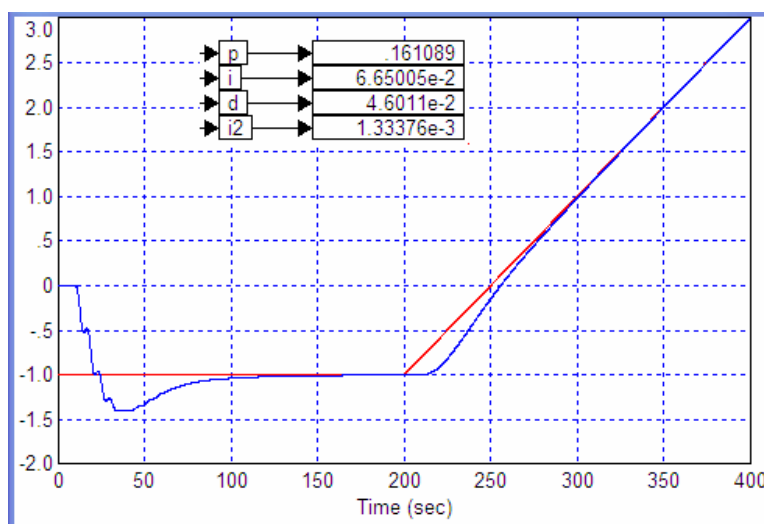


Рис. 6. Результат оптимизации регулятора по структуре рис. 3 с уменьшенным весовым коэффициентом $K_w = 100$

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что замена усреднения по ансамблю систем на усреднение по времени эффективна в том случае, если речь идет о суперпозиции нескольких входных воздействий (заданий, помех) на

систему. При этом следует тщательно анализировать результат по критериям качества переходных процессов.

3. О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УСРЕДНЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

Рассмотренный подход было бы заманчиво распространить на решение задачи синтеза робастных систем. Суть этого подхода состоит в том, что если один из коэффициентов объекта изменяется в некоторых пределах, то можно моделировать параллельную работу двух систем, в которых регуляторы идентичны, а модели объектов взяты с крайними значениями данного коэффициента. Стоимостная функция в этом случае может быть вычислена как сумма стоимостных функций, вычисленных от ошибки в каждой системе в отдельности. В этом случае может быть получен регулятор, успешно управляющий объектами со всеми возможными значениями данного коэффициента.

Если таких коэффициентов несколько, то необходимо множество моделей систем, моделируемых параллельно. Например, для того, чтобы рассчитать объект, в котором два параметра заданы в некоторых интервалах, требуется в идеале использовать четыре параллельно работающие модели. Если таких параметров три, то необходимо восемь моделей, чтобы перебрать все возможные крайние значения всех коэффициентов. С ростом количества коэффициентов количество требуемых моделей растет как количество вершин n -мерного куба.

Если бы в ходе моделирования можно было изменять параметры объекта во некоторой схеме, то можно было бы использовать более простую схему моделирования, работающую большее время, чтобы осуществлять проектирование робастной системы.

Моделирование показало, что изменение коэффициентов объекта в ходе функционирования крайне затруднено. В частности, если использовать блок переменной `value`, задавая его значение извне, то, к сожалению, система использует то значение, которое данная величина имела к моменту начала моделирования. Изменяемую величину можно вводить путем блока умножения или путем использования ключей. Но такой подход требует сложной модели.

В целом следует заключить, что наиболее доступные версии программы VisSim к настоящему времени пока еще не достаточны для использования этого метода. Вместе с тем, если новейшие версии этой программы позволяют использовать существенно большее количество блоков при моделировании, то в этом случае такой подход не требуется. Кроме того, параллельное моделирование многих систем наиболее наглядно и проектирование такой системы не требует большого интеллектуального напряжения: в структуре всего лишь используется дублирование систем с заданием в них крайних значений параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье исследована возможность использования усреднения во времени вместо усреднения по множеству.

Показано, что этот метод успешно работает при необходимости оптимизации системы для входных сигналов и (или) помех различного вида. Вместе с тем, отмечается, что исследования показали, что синтез робастных систем таким путем неэффективен. Моделирование нескольких систем, работающих параллельно, более эффективно.

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] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Влияние вида тестовых сигналов на результат численной оптимизации ПИД и ПИ2Д регуляторов. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), Технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 43–51.
- [2] Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического регулирования. М.: Высш. Шк. 2006. 365 с.: ил.
- [3] 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>.
- [4] Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384с.
- [5] Клиначев Н. В. VisSim в России: студенческая версия программы VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [6] 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/
- [7] 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.
- [8] 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.

Basis for the Use of Complex Form Signals in Numerical Optimization of Controllers for Closed-Loop Systems

V.A. ZHMUD, L.V. DIMITROV

Abstract: In a previous paper [1] the problem of designing the controller, providing astatism second order. It is shown that if used as a test signal step jump, the resulting system is satisfactorily fulfills ramp signals, and vice versa, if you use the ramp signals are received by the system unsatisfactory otrabotyvaet step jumps in numerical optimization controller. The paper presents the optimization method using two parallel operating system models with different input signals (step and ramp). It has been shown that replacement time averaging does not always lead to the desired result, although in principle this method operational. Yet this substitution would be very useful if it was possible and appropriate, as this would simplify the modeling scheme by increasing the simulation time. The complexity of the scheme may be the deciding factor, limiting the use of the method, because the software always has only limited capacity for simultaneous realization of simulation and optimization of complex structures with many elements and many links. Restriction on the simulation time is not as critical as it only increases the duration of the experiment to optimize the regulator. If the assigned task is urgent, it is likely that a reserve of time to find its calculation is much easier than to go to other software, and even a newer version of the previously used software. This article explores the possibility of such a replacement on the set ustredneniya on an average over time.

Key words: management, closed circuits, controls, design of control systems, digital control, feedback, optimization

REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud', L.V. Dimitrov. Vlijanie vida testovyh signalov na rezul'tat chislennoj optimizacii PID i PI2D reguljatorov. FGBOU VO NGTU (Novosibirsk, Rossija), Tehniceskij universitet Sofii (Sofija, Bolgarija). Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2016. № 2 (16). S. 43–51.
- [2] Vostrikov A. S., Francuzova G. A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. M.: Vyssh. Shk. 2006. 365 s.: il.
- [3] Klinachjov N. V. Teorija sistem avtomaticheskogo

regulirovanija i upravlenija: Ucheb.-metod. kompleks. Offline versija 3.6. Cheljabinsk, 2005. sm. takzhe: URL: http://model.exponenta.ru/tau_lec.html.

- [4] D'jakonov V.P. VisSim+Mathcad+MATLAB. Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie. – M.: SOLON-Press, 2004. – 384s.
- [5] Klinachev N. V. VisSim v Rossii; studencheskaja versija programmy VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [6] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravljenija v srede VisSim // Trudy seminarov po avtomatike i programmnoj inzhenerii, posvjashhenogo 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/
- [7] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravljenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 s.
- [8] 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.



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: lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg