

Модификация метода расчета ПИД-регулятора для колебательного объекта второго порядка с запаздыванием

Vui Van Tam

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Данная статья решает задачу управления объектом, склонным к колебаниям. Модель объекта представляет собой последовательное включение фильтра второго порядка (колебательное звено) и звено чистого запаздывания. Такие объекты особенно трудны для управления, поскольку в переходном процессе возникают колебания большой амплитуды, которые долго не затухают, это приводит к многократному перерегулированию. Статья решает задачу устранения перерегулирования. Результаты подтверждаются моделированием.

Ключевые слова: автоматика, управление, регулятор, оптимизация, динамическая ошибка, статическая ошибка, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Управление техническими объектами требуется во множестве практических устройствах науки и техники. Решение этой задачи состоит в расчете регулятора на основании имеющейся математической модели объекта управления. Типичная структура системы автоматического управления показана на *Рис. 1*. Такая система состоит из объекта, регулятора и дифференциального усилителя (вычитающего устройства или вычитателя). Эти элементы соединены, как показано на *Рис. 1*, неинвертирующий вход вычитателя является входом системы, а выходом её является выход объекта.

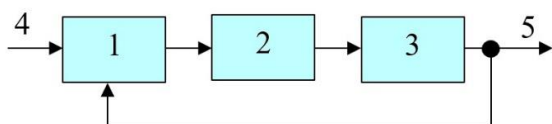


Рис. 1. Типичная структура системы с регулятором: 1 – дифференциальный усилитель (вычитатель), 2 – регулятор, 3 – объект, 4 – вход системы, 5 – выход системы

Управление колебательным объектом встречает некоторые трудности, поскольку в этом случае в переходном процессе возникают характерные колебания, которые порождают многократное перерегулирование. В данной статье решается задача устранения перерегулирования при условии достижения по возможности наибольшего быстродействия и наименьшей статической и динамической ошибки управления.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ставится задача проектирования последовательного регулятора для объекта, описываемого передаточной функцией вида:

$$W_o = \frac{k}{1+T_1s+T_2^2s^2+\dots T_n^n s^n} e^{-T_0s} . \quad (1)$$

Регулятор должен работать в структуре, показанной на *Рис. 1*. Как правило, требуется спроектировать ПИД-регулятор, общий вид которого задан следующей передаточной функцией:

$$W_R = K_P + K_I s^{-1} + K_D s. \quad (2)$$

1. МЕТОД РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Предлагается использование метода численной оптимизации при математическом моделировании замкнутой системы автоматического управления, как, например, это сделано в публикациях [1], [2].

В этом случае может быть использована, например, следующая целевая функция для оптимизации регулятора:

$$F_c = \int_0^T \sum_{i=0}^n w_i f_i dt , \quad (3)$$

Здесь w_i – весовые функции по выбору, осуществляемому в ходе решения задачи,

$$f_1 = |e(t)|t, \quad (4)$$

$$f_2 = \max \{0, e(t) \frac{de(t)}{dt}\}. \quad (5)$$

Остальные компоненты соотношения (3) могут быть добавлены в ходе решения задачи в соответствии с предложениями из публикаций [1], [2].

2. УТОЧНЕНИЕ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Метод численной оптимизации не может быть использован в алгебраической форме без указания на конкретные численные значения параметров объекта, этим он отличается от аналитических методов. Достоинством этого метода является большая простота и эффективность, а также возможность решать задачу в случае наличия запаздывания и существенных нелинейностей в модели объекта.

Метод решения задачи относительно неплохо разработан, изучен и опробован на различных

моделях, но встречаются такие модели объекта, при которых этот метод работает недостаточно эффективно. Именно на примере такой модели необходима разработка дополнительных методов или приемов, которые позволили бы успешно решить поставленную задачу с этими сложными объектами.

Одним из сложных случаев является склонность объекта к колебаниям, что порождается наличием запаздывания и относительно малым значением средних членов в знаменателе полинома передаточной функции объекта (1). В этом случае переходный процесс содержит множество колебаний, причем, во время этих колебаний имеет место

перерегулирование, то есть превышение выходного значения над требуемым значением выхода объекта.

Например, рассмотрим модель объекта со следующими численными значениями его параметров:

$$W_o = \frac{10}{1+0.01s+s^2} e^{-s}. \quad (6)$$

Используем для моделирования и оптимизации программу *VisSim*. Графическое программирование задачи оптимизации осуществляется в соответствии с проектом, который показан на *Рис. 2*.

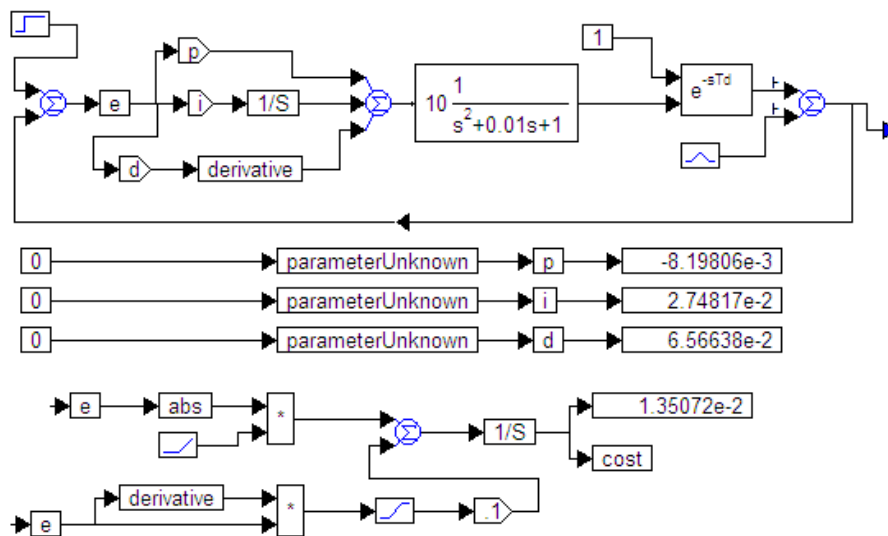


Рис. 2. Структура (проект) для оптимизации регулятора (2) для объекта (6) по критерию (3), (4), (5) при $w_1 = 1, w_2 = 0,1$

Результатом оптимизации являются вычисленные параметры регулятора (2), показанные в дисплеях справа, а также график переходного процесса, показанный на *Рис. 3*. Полученные значения коэффициентов регулятора имеют следующие значения: $K_P = -0,008198$; $K_I = 0,02748$; $K_D = 0,06566$. Как видим, в системе имеется два заметных перерегулирования, второе из которых больше, оно достигает 9%, тогда как первое приблизительно равно 5%. Далее имеются менее существенные колебания, которые со временем затухают относительно быстро, но легко различаются четыре итоговых колебания.

Если весовой коэффициент второго слагаемого в целевой функции (6) повысить в 10 раз, т.е. использовать $w_2 = 1$, то в результате получаем систему с переходным процессом, показанным на *Рис. 4*. Полученные новые значения коэффициентов регулятора имеют следующие значения: $K_P = -0,002364$; $K_I = 0,02056$; $K_D = 0,07536$. Можно отметить, что перерегулирование существенно стало меньшим, оно достигает лишь значения 3%, но при этом переходный процесс замедлился и в

нем появилось больше колебаний, которые длятся большее время.

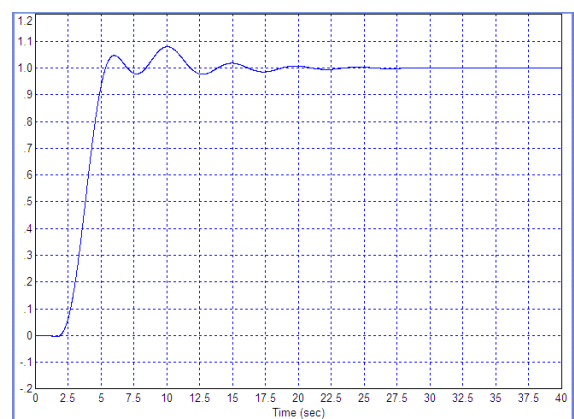


Рис. 3. Переходный процесс в системе по *Рис. 2*

Если весовой коэффициент еще увеличить в 10 раз, то получим процесс, показанный на *Рис. 5*, при этом коэффициенты регулятора приобретают следующие значения: $K_P = -0,002613$; $K_I = 0,01948$; $K_D = 0,0697$.

Таким образом, можно сделать вывод, что с объектом вида (6) метод является в достаточной степени работоспособным, при этом разработчик может достигать компромисса между требуемым быстродействием и требуемым снижением величины и количества колебаний, включая величину наибольшего перерегулирования. Если весовой коэффициент второго слагаемого под интегралом стоимостной (целевой) функции (3) увеличивать, то амплитуда колебаний будет падать, но цена за это может состоять в увеличении длительности переходного процесса.

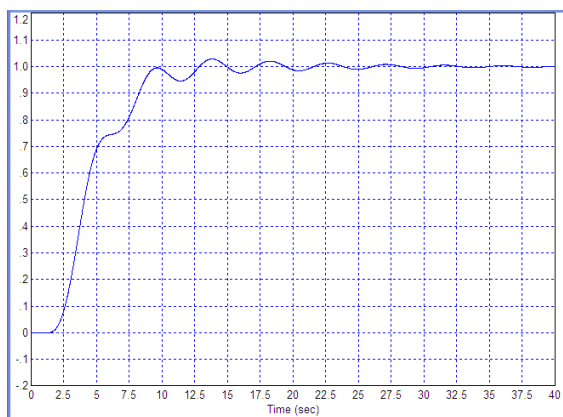


Рис. 4. Переходный процесс в системе по Рис. 2 при $w_2 = 1$

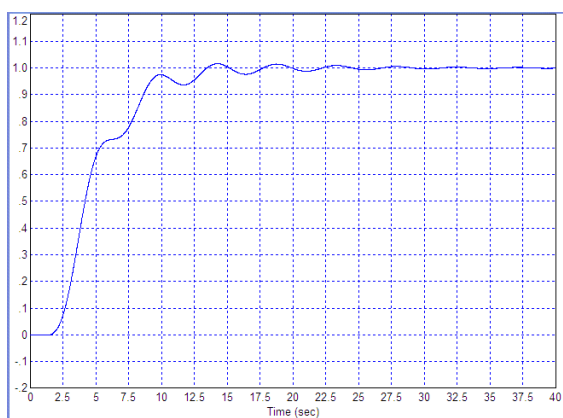


Рис. 5. Переходный процесс в системе по Рис. 2 при $w_2 = 10$

Соответственно, уменьшение этого весового коэффициента может обеспечить ускорение переходного процесса в целом, то есть ускорить начальное движение к цели управления, но цена этого улучшения состоит в повышении амплитуды колебаний и увеличении перерегулирования.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧЕНИЯ СРЕДНЕГО КОЭФФИЦИЕНТА В ПОЛИНОМЕ ЗНАМЕНАТЕЛЯ

Малое значение среднего коэффициента в полиноме знаменателя приводит к повышению склонности к колебаниям всего объекта и системы в целом. Если уменьшить в объекте (6)

второй член полинома в знаменателе до значения 0,002, при сохранении весового коэффициента равным $w_2 = 10$ получается система, в которой переходные процессы незначительно отличаются от процессов, показанных на Рис. 5. Дальнейшее уменьшение этого коэффициента даже до значения 0,0001 и меньше также не приводит к существенному изменению вида получаемого переходного процесса, как показано на Рис. 6. Следовательно, в данной системе наибольшее влияние на колебания оказывает запаздывание в объекте, равное 1 с.

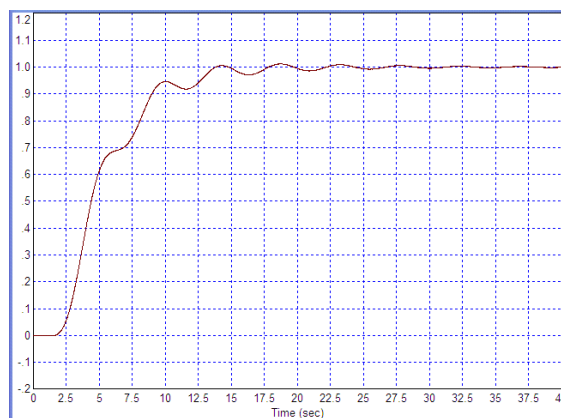


Рис. 6. Переходный процесс в системе по Рис. 2 при $w_2 = 10$ при изменении второго слагаемого полинома передаточной функции объекта до значения 0,001

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Если величину запаздывания уменьшить вдвое, то даже при условии, что второй коэффициент в знаменателе передаточной функции уменьшен до значения 0,0001, оптимизация даёт систему, переходный процесс которой показан на Рис. 7. Передаточная функция объекта в этом случае равна

$$W_o = \frac{10}{1+0.0001s+s^2} e^{-0.5s}. \quad (7)$$

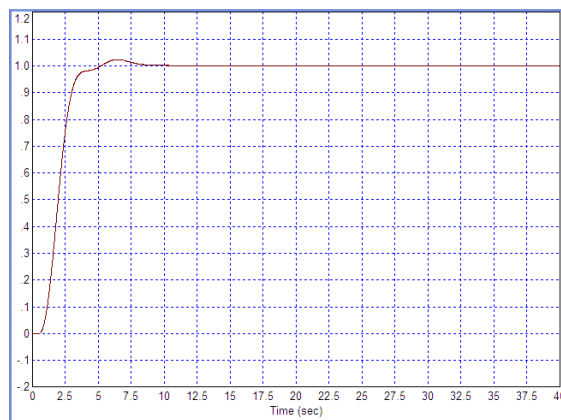


Рис. 7. Переходный процесс в системе по Рис. 2 с объектом (7) при $w_2 = 10$

Полученный процесс почти идеален: перерегулирование пренебрежимо мало, оно не

превышает 2%, процесс осуществляется очень быстро, в сравнении с процессами, показанными ранее, этот процесс отличается в лучшую сторону по всем параметрам и весьма существенно. Можно сделать вывод, что при указанной модели объекта наиболее вредоносным фактором является именно запаздывание, и при его уменьшении проблема управления объектом резко упрощается.

Для дальнейшего исследования влияния запаздывания увеличим исходную величину запаздывания в модели объекта в 1,5 раза. Получим следующую модель передаточной функции объекта:

$$W_O = \frac{10}{1+0.01s+s^2} e^{-1.5s}. \quad (8)$$

В результате оптимизации с весовой функцией $w_2 = 10$ рассчитываются следующие коэффициенты регулятора: $K_P = -0,01117$; $K_I = 0,01973$; $K_D = 0,02968$. Переходный процесс в этой системе показан на Рис. 8. В этом процессе перерегулирование достигает 12%, имеется очень много колебаний, не менее шести с заметной амплитудой. На этом основании можно сделать вывод, что введение запаздывание сильно усложнило задачу проектирования регулятора по рассматриваемому методу.

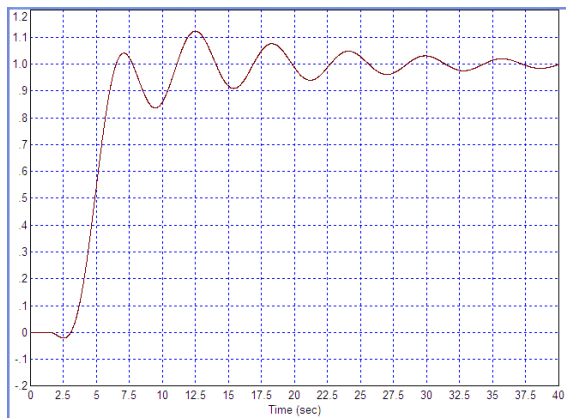


Рис. 8. Переходный процесс в системе по Рис. 2 с объектом (8) при $w_2 = 10$

Далее попробуем увеличить запаздывание до значения, равного 2:

$$W_O = \frac{10}{1+0.01s+s^2} e^{-2s}. \quad (9)$$

Переходный процесс получается неудовлетворительным по количеству колебаний, он показан на Рис. 9. Если же вдвое увеличить весовой коэффициент, доведя его до значения $w_2 = 20$, то в этих условиях метод оптимизации даёт следующие коэффициенты регулятора: $K_P = -0,008676$; $K_I = 0,01729$; $K_D = 0,8221$. Полученный переходный процесс показан на Рис. 10.

Далее попробуем изменять общий коэффициент усиления регулятора после настройки ПИД-регулятора в соответствии с результатом,

показанным на Рис. 9. С этой целью введем в систему последовательно с ПИД-регулятором усилитель с изменяемым коэффициентом усиления, как показано на Рис. 11. Проект для моделирования такой системы в программе VisSim показан на Рис. 12.

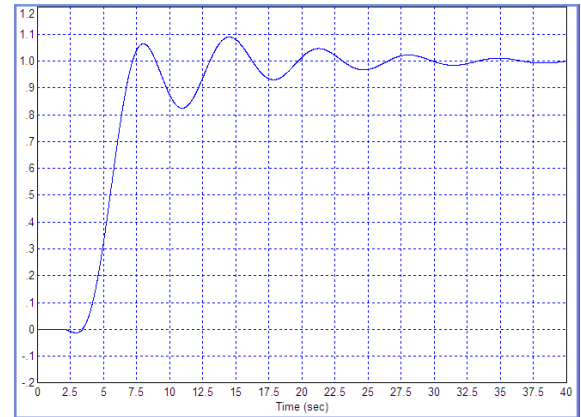


Рис. 9. Переходный процесс в системе по Рис. 2 с объектом (9) при $w_2 = 10$

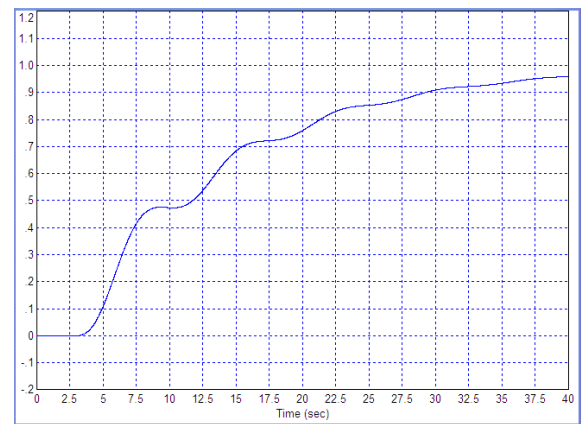


Рис. 10. Переходный процесс в системе по Рис. 2 с объектом (9) при $w_2 = 10$

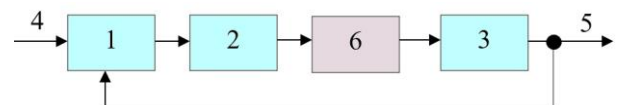


Рис. 11. Модифицированная структура системы с регулятором: 1 – дифференциальный усилитель (вычитатель), 2 – регулятор, 3 – объект, 4 – вход системы, 5 – выход системы, усилитель с изменяемым коэффициентом усиления.

На Рис. 13 показаны три переходных процесса, полученные при разных значениях коэффициента усиления этого дополнительно введенного усилителя, а именно: верхняя линия соответствует $K = 1$, средняя линия соответствует $K = 0,4$, нижняя линия соответствует $K = 0,25$. Коэффициенты регулятора в этом случае такие: $K_P = -0,008$; $K_I = 0,015$; $K_D = 0,004$. При этом время моделирования (в том числе при оптимизации) было увеличено вдвое, что

способствовало более успешному решению задачи. Напомним, что в соответствии с рекомендациями авторов метода, время моделирования следует выбирать так, чтобы переход-

ный процесс в результате оптимизации завершался бы примерно за 80% этого времени [3].

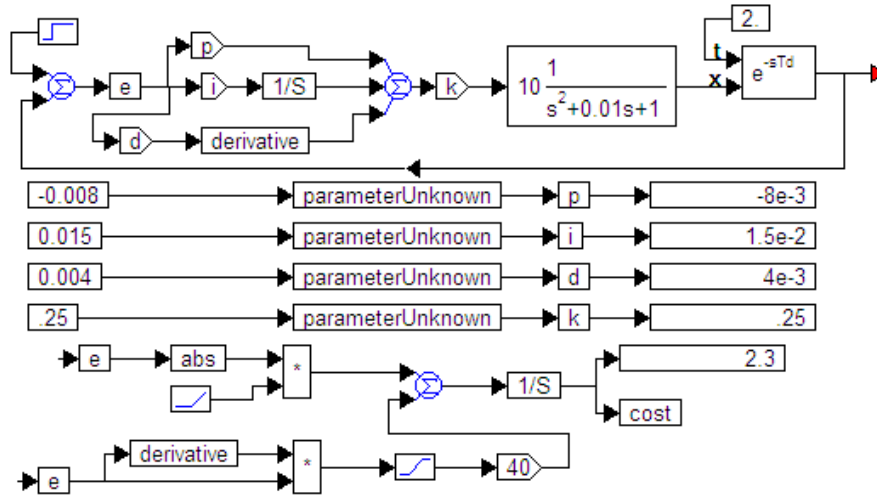


Рис. 12. Структура (проект) для оптимизации регулятора (2) для объекта (9) по критерию (3), (4), (5) при $w_1 = 1, w_2 = 40$

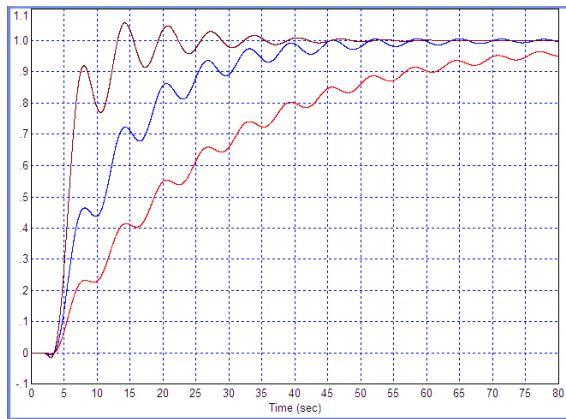


Рис. 13. Переходный процесс в системе по Рис. 11 с объектом (9) при $w_2 = 20$

следующий результат: $K_P = -0,008126$; $K_I = 0,0196$; $K_D = -0,0497$; $K = 0,243$. На Рис. 15 приведен соответствующий переходный процесс.

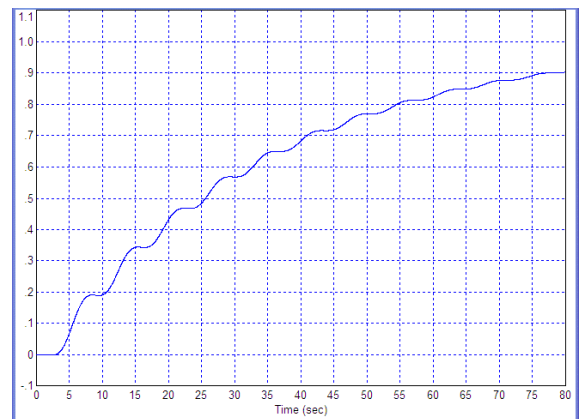


Рис. 14. Переходный процесс в системе по Рис. 14 с объектом (9) при $w_2 = 40$

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ ЧЕТЫРЕХ ПАРАМЕТРОВ

Далее предлагается осуществить формальную численную оптимизацию четырех параметров, четвертый из которых – это общий коэффициент усиления. Чисто теоретически предположительно результат должен получаться такой же, как при оптимизации трех параметров ПИД-регулятора, то есть все коэффициенты ПИД-регулятора в итоге должны быть равны произведению соответствующего частного коэффициента на общий коэффициент усиления. Но на практике вследствие особенностей процесса поиска при оптимизации, по видимому, происходит иное движение, и результат некоторым образом отличается. В частности, при $w_2 = 40$, получаем следующий результат: $K_P = -0,0036$; $K_I = 0,0142$; $K_D = -0,0752$; $K = 0,2$. На Рис. 14 приведен соответствующий переходный процесс. В случае $w_2 = 15$, получаем

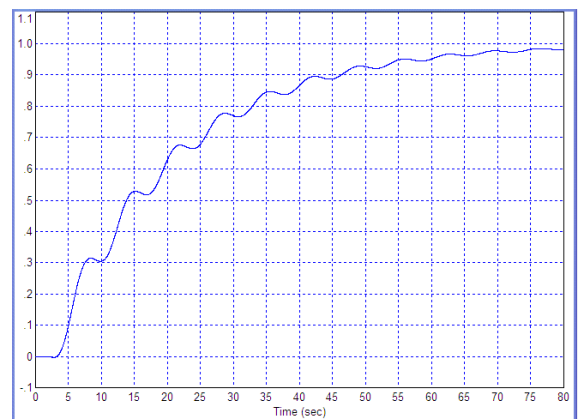


Рис. 15. Переходный процесс в системе по Рис. 14 с объектом (9) при $w_2 = 15$

Если время моделирования увеличить до 100 с, при $w_2 = 15$, получаем следующий результат: $K_P = -0,00894$; $K_I = 0,0211$; $K_D = -0,0462$; $K = 0,25$. На Рис. 16 приведен соответствующий переходный процесс.

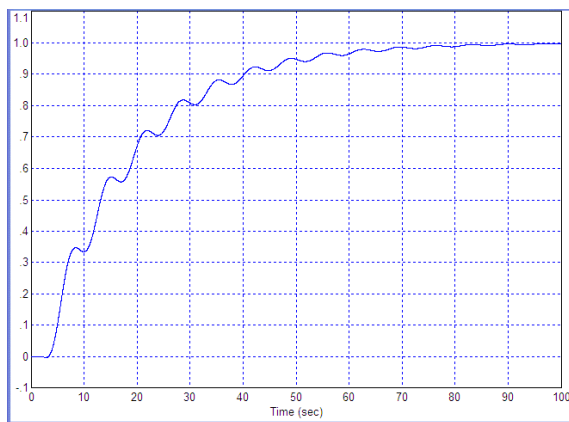


Рис. 16. Переходный процесс в системе по Рис. 14 с объектом (9) при $w_2 = 15$ при времени моделирования $T = 100$ с

Полученный процесс похож формально относительно неплох, хотя движение является немонотонным, и время управления составляет почти 100 с, однако, перерегулирования нет.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, показано, что если задавать коэффициенты ПИД-регулятора не тремя параметрами, а четырьмя, из которых четвертый параметр – это общий коэффициент усиления, то можно, по-видимому, пустить процедуру оптимизации несколько иным путем, что позволяет отыскать более эффективно оптимальное решение. Кроме того, после получения результата оптимизации можно дополнительно скорректировать эффект действия регулятора путем изменения в некоторых пределах общего коэффициента усиления. Безусловно, такая коррекция превращает регулятор, рассчитанный методом оптимизации, в неоптимальный, но следует напомнить, что хотя всякий регулятор, рассчитанный методом оптимизации, является оптимальным, его оптимальность имеет место только при фиксированных параметрах целевой функции, при фиксированной длительности переходного процесса, при фиксированном тестовом задании, шаге квантования и фиксации выбранных весовых функций, параметров всех используемых нелинейностей (в частности, нелинейного элемента). Если хотя бы один из параметров изменяется, то оптимальным становится другой регулятор.

Возникает закономерный вопрос: по какой причине может оказаться, что решение фактически одной и той же задачи методом численной оптимизации дает разные результаты в

зависимости от частных постановки этой задачи. Действительно, если коэффициенты ПИД-регулятора задавать не тремя числами, а четырьмя, при этом четвертое число является общим множителем, то задача становится некоторым образом неоднозначной, и поэтому можно было бы в том числе предполагать, что процедура оптимизации может не останавливаться, или каждый раз останавливаться в новой точке, ведь если, например, общий коэффициент умножить на какое-то число, а все остальные коэффициенты разделить на это же самое число, то получится тот же самый регулятор. Ответом на это может быть предположение о том, что если для задачи с тремя параметрами решением является точка в трехмерном пространстве, то в задаче с четырьмя параметрами решением является линия в четырехмерном пространстве, остановка на любой точке этой линии даёт то же самое решение. Процедура остановки определена не слишком жестко, если приращение целевой функции не превышает наперед заданную малую величину, то процедура оптимизации заканчивается. То есть она останавливается не на линии, а в окрестности этой линии, а для трех параметров она заканчивается не в точке, а в окрестности этой точки. Также могут иметь место некоторые локальные экстремумы, эти все факторы в совокупности определяют неполное совпадение результатов при двух разных путях оптимизации ПИД-регулятора. В любом случае моделирование подтвердило, что предложенный в данной статье метод позволил решить задачу более успешно, чем традиционный метод отыскания трех коэффициентов ПИД-регулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод проектирования ПИД-регулятора методом численной оптимизации, отличающийся тем, что вместо отыскания трех параметров регулятора отыскиваются четыре его параметра, где дополнительный четвертый параметр является общим коэффициентом усиления. Эта модификация превращает задачу отыскания точки в трехмерном пространстве в задачу отыскания любой точки линии в четырехмерном пространстве. Моделирование показало, что в этом случае процедура поиска работает эффективнее, что объясняется отличием работы встроенных алгоритмов численной оптимизации в используемом программном обеспечении.

В дальнейшем предполагается исследовать, как данный метод будет работать при проектировании энергосберегающих регуляторов [4], а также применение этого метода понижения порядка системы (по основным медленным движениям) по сравнению с порядком объекта [5].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В.А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем. Монография / Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2012.
- [2] 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.
- [3] Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. динамика мехатронных систем. Учебное пособие / Новосибирск, 2014.
- [4] Жмудь В.А., Заворин А.Н. метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции. Институт проблем управления сложными системами, Самарский научный центр Российской академии наук; Под ред.: Е.А.

Федосова, Н.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. 2014. С. 557-567.



Буй Ван Там - аспирант кафедры автоматизации НГТУ. В 2006 году окончил военно-морскую академию в Нячанге. Он получил степень М.С. (магистра) в области кибернетики и автоматизации в военно-технической академии, Ханой, Вьетнам.

В 2014 г. С 2015 по 2019 гг. Участвовал в исследованиях в Военно-морской академии Вьетнама. С 2009 года он преподает в Военно-морской академии Вьетнама. Его исследовательские интересы включают математически описательные объекты; обследование качества системы автоматического управления; синтезированный контроллер для объектов на кораблях.
E-mail: tamtlpt@gmail.com

Статья получена 21.01.2021.

Modification of the Method for Calculating the PID Controller for a Second-Order Oscillatory Plant with Delay

Bui Van Tam

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: This paper solves the problem of controlling an object prone to vibrations. The object model is a sequential inclusion of a second-order filter (oscillatory link) and a pure retardation link. Such objects are especially difficult to control, since oscillations of large amplitude arise in the transient process, which do not damp for a long time, this leads to multiple overshoots. The article solves the problem of overshoot elimination. The results are confirmed by modeling.

Key words: automation, control, regulator, optimization, dynamic error, static error, modeling

REFERENCES

- [1] Zhmud V.A. Modelirovaniye, issledovaniye i optimizatsiya zamknutykh sistem. Monografiya / Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. Novosibirsk, 2012.
- [2] Zhmud V.A., Yadryshnikov O. Chislennaya optimizatsiya PID-regulyatorov s ispol'zovaniyem detektora pravil'nosti dvizheniya v tselevoy funktsii. Avtomatika i programnaya inzheneriya. 2013. № 1 (3). S. 24-29.
- [3] Zhmud V.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. dinamika mekhatronnykh sistem. Uchebnoye posobiye / Novosibirsk, 2014.
- [4] Zhmud V.A., Zavorin A.N. metod proyektirovaniya energosberegayushchikh regulyatorov dlya slozhnykh ob'yektov s chastichno neizvestnoy model'yu. V sbornike: Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh. Trudy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii. Institut problem upravleniya slozhnymi sistemami, Samarskiy nauchnyy tsentr Rossiyskoy

akademii nauk; Pod red.: Ye.A. Fedosova, N.A. Kuznetsova, V.A. Vittikha. 2014. S. 557-567



Bui Van Tam is PhD-student of NSTU, Department of Automation. He graduated university in 2006 at naval academy, Nha Trang. He received M.S. degrees in cybernetics and automation engineering from military technical academy, Ha Noi, Viet Nam.

In 2014. From 2015 to 2019, he was participating in research in Naval Academy, Viet Nam. Since 2009, he has been a teacher in Naval Academy, Viet Nam. His research interests include mathematically descriptive objects; automatic control system quality survey; synthesized controller for objects on ships.
E-mail: tamtlpt@gmail.com

The paper has been received on 21/01/2021.