

Синтез ПИД-регулятора для управления нелинейным объектом с положительной нелинейной обратной связью

В.А. Жмудь^{1, 2, 3}, В.М. Семибаламут³

¹АО «Новосибирский институт программных систем», Новосибирск, Россия

²Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

³Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация. Наиболее сложными для управления являются нелинейные объекты, среди них наиболее сложными являются объекты с нелинейными обратными связями, в этом классе объектов самыми сложными являются такие объекты, в которых эти нелинейные обратные связи – положительные. Это означает, что каждое отклонение от равновесного состояния в этом объекте за счет действия обратных связей дополнительно возрастает, провоцируя лавинообразный процесс отклонения от равновесного состояния с нарастающей скоростью. Такой процесс может развиваться до весьма больших значений, которые ограничиваются только физическими возможностями формирования максимального выходного отклонения от равновесия, что при моделировании или при аналитическом вычислении выходного состояния даёт бесконечно нарастающее значение. Некоторые модели объектов этого класса могут быть настолько сложными, что решение задачи управления может быть осуществлен только самым эффективным из всех известных способов, состоящим в создании псевдо-локальных обратных стабилизирующих связей в дополнение к традиционному ПИД-регулятору. Если не принимать в расчет этот метод, который также может иметь свои недостатки, а ориентироваться только на традиционную схему последовательного ПИД-регулятора, то методов проектирования такого регулятора известно крайне мало. Самый эффективный метод состоит в численной оптимизации при моделировании, однако, первые эксперименты с одним из таких модельных экспериментов окончились неудачей. Данная статья раскрывает причины этой неудачи и предлагает метод преодоления этой неудачи, эффективность решения поставленной задачи этим способом подтверждается успешным её решением.

Ключевые слова: автоматика, ПИД-регулятор, управление, нелинейный объект, численная оптимизация, моделирование, стоимостная функция

ВВЕДЕНИЕ

В публикациях [1], [2] обсуждается решение задачи управления объектом с нелинейными обратными связями следующего вида:

$$\ddot{y} = a_1|y|\dot{y} - a_2|y|y + b(t)u + M(t). \quad (1)$$

«Здесь t – время, y – выходной сигнал объекта, \dot{y} – его первая производная по времени, \ddot{y} – его вторая производная по времени, u – сигнал управления, подаваемый на вход, который мы можем формировать по своему желанию, исходя их результатов измерения выходного сигнала, $M(t)$ – неизвестное и не контролируемое возмущение, поступающее на объект, приложенное к его выходу, a_1 и a_2 – постоянные известные коэффициенты, в частности, $a_1 = 5$, $a_2 = 2$ » [2]. Здесь мы изменили знак коэффициента a_1 в сравнении с [2], заменили минус на плюс. Это делает соответствующую обратную связь положительной. Ранее показано, что эта задача не простая даже в том случае, если обе нелинейные обратные связи – отрицательные [1], [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В нелинейном объекте (1) положим первый коэффициент отрицательным, что делает обратную связь, содержащую этот коэффициент, положительной с учетом уже имеющегося знака «минус» в уравнении (1). Ставится задача отыскания коэффициентов последовательного

ПИД-регулятора в традиционной структуре системы автоматического управления с единичной отрицательной обратной связью: требуется, чтобы полученная система обладала по возможности наилучшими из возможных показателями качества, включающих устойчивость, длительность переходного процесса, перерегулирование. Передаточная функция ПИД-регулятора также отыскивается в традиционной форме:

$$W(s) = k_p + \frac{1}{s}k_i + sk_d. \quad (2)$$

«Здесь k_p , k_i , k_d – коэффициенты пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего трактов, s – оператор преобразования Лапласа» [2]. Особенностью постановки задачи является положительная обратная связь внутреннего контура структуры модели объекта.

ОБОСНОВАНИЕ ТРУДНОСТИ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ

Можно попробовать решать поставленную задачу отыскания наилучших значений коэффициентов регулятора с помощью численной оптимизации с использованием программы *VisSim* [3–11]. Для решения этой задачи целесообразно запрограммировать графическим путем структуру, которая содержит собственно систему, то есть объект, регулятор и обратную связь, а также три блока “*Parameter Unknown*” для запуска процедуры оптимизации, а также один общий блок “*Cost*”,

на вход которого поступает результат вычисления стоимостной функции. Для вычисления стоимостной функции из сигнала ошибки требуется также соответствующая структура, которая осуществляет эти вычисления в полном соответствии со следующим уравнением [2].

$$F_c(T) = \int_0^T \{t|e(t)| + f[e(t)]\}dt. \quad (3)$$

Здесь

$$f[e(t)] = 1000 \cdot \max \{0; e(t) \frac{d}{dt} e(t)\}. \quad (4)$$

В очень многих случаях этой методики вполне достаточно для получения успешного решения задачи [8–11]. Достаточно выбрать режим «оптимизации», запустить его, и в итоге получаются требуемые значения коэффициентов для передаточной функции (2). Однако в случае, изменения знака обратной связи, с относительно большим значением этого коэффициента по величине, $a_1 = 5$, процедура, к сожалению, не завершается успешно. Происходит следующее: поиск уходит в область, где, как минимум, один из искомым коэффициентом и (или) значение выходного сигнала в системе устремляются к бесконечности, после достижения максимально допустимого для данной версии программы VisSim поиск прерывается, никакого приемлемого значения для набора коэффициентов не отыскивается.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Как известно из предыдущих исследований, в случае отрицательной обратной связи процедура синтеза регулятора завершается автоматически успешно. Если первый коэффициент задать нулевым, т. е. $a_1 = 0$, тогда метод численной оптимизации также дает успешное решение. На этом основании можно утверждать, что при малом значении этого коэффициента решение задачи также будет успешным. Предлагается осуществить итеративный метод настройки, который состоит в том, что начальные условия задачи принимаются облегченными, при которых данный коэффициент принимает малое значение $a_1 = 0,01$. Структура такой системы показана на Рис. 1. В результате численной оптимизации получены следующие коэффициенты регулятора: $k_p = -0,0481$, $k_i = 0,786$, $k_D = 3,2185$. Соответствующий переходный процесс в системе как отклик на единичный ступенчатый скачок задания $u(t)$ показан на Рис. 2. Этот процесс демонстрирует высокое качество: перерегулирование отсутствует, запас устойчивости по этой причине оценивается как значительный. Это позволяет предполагать, что при небольшом увеличении указанного коэффициента положительной обратной связи система ещё может оставаться устойчивой.

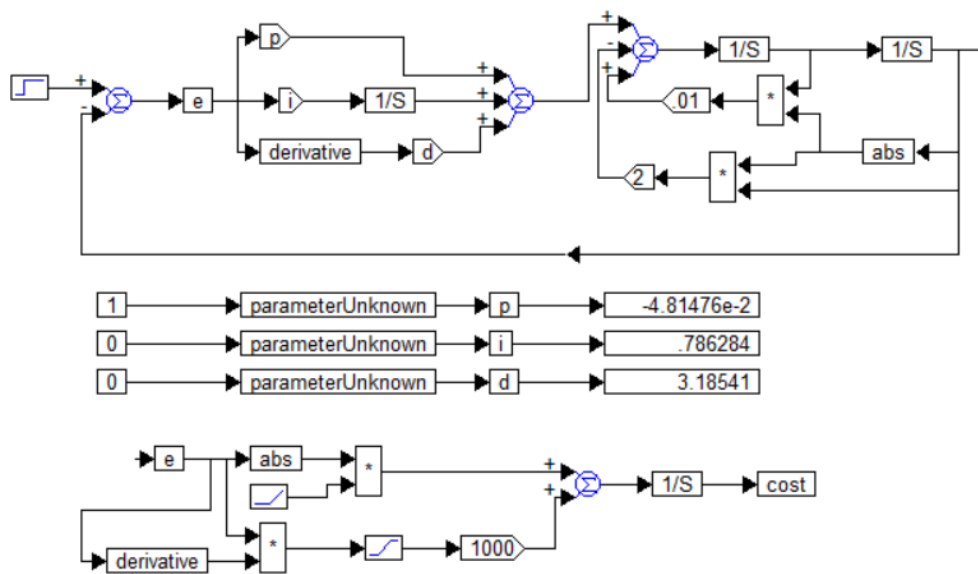


Рис. 1. Структура предлагаемой системы управления: p , i , d – упрощенные обозначения коэффициентов с такими индексами, соответственно, т.е. k_p , k_i , k_D , $derivative$ – блок вычисления производной, $1/S$ – блок вычисления интегратора, Σ – блок суммирования или вычитания, в зависимости от знаков у входов, $v(t)$ – сигнал задания, т. е. предписанного значения для выходной величины $y(t)$, пятиугольники с цифрой – коэффициенты усиления с обозначенным значением коэффициента, abs – блок вычисления абсолютного значения, прямоугольники со звездочкой внутри – блоки умножения сигналов, e – сигнал ошибки

Полученные значения коэффициентов регулятора (2) предлагается взять за стартовые значения, после чего увеличить коэффициент, например, вдвое, получив при этом $a_1 = 0,01$. С новыми значениями коэффициента регулятора

мы, используя их в качестве стартовых значений вновь увеличиваем значение этого коэффициента и снова запускаем процесс автоматической численной оптимизации. Постепенно можно заметить усложнение задачи. Так,

например, при коэффициентах, полученных при оптимизации регулятора для $a_1 = 0,2$,

переходный процесс по виду почти не отличается от процесса, показанного на *Рис. 2*.

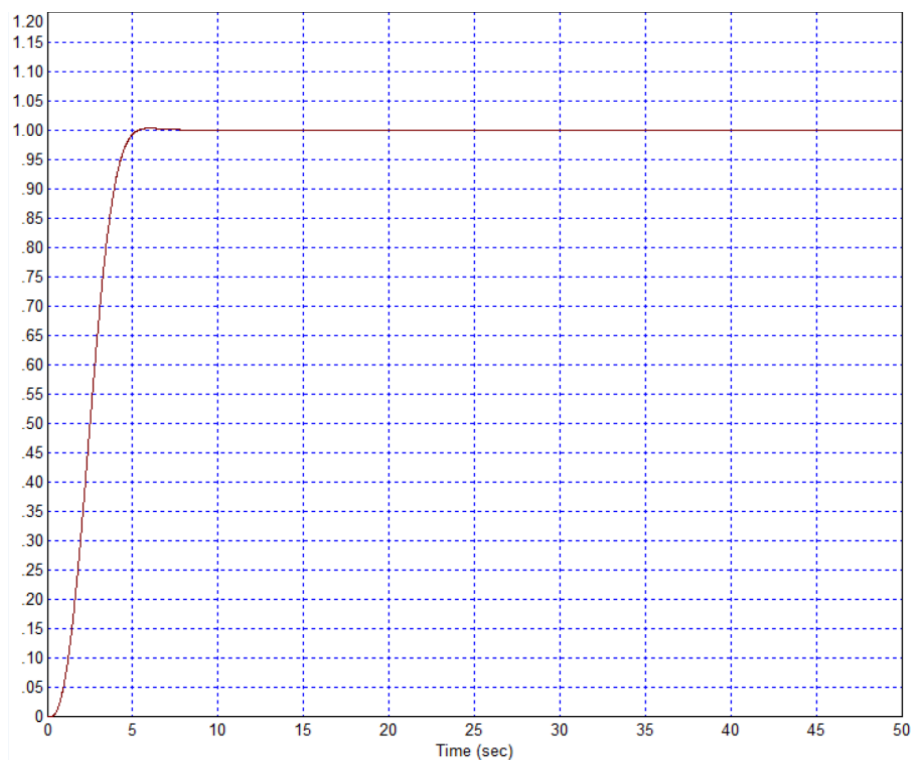


Рис. 2. Переходные процессы в системе по структуре *Рис. 1*

Если же при этих значениях коэффициентов регулятора задать значение параметра модели объекта $a_1 = 2$, то в полученном процессе перерегулирование составит 6%, хотя процесс

остаётся устойчивым, как показано на *Рис. 3*. Если же используя эти стартовые значения запустить оптимизацию, получаем процесс, показанный на *Рис. 4*.

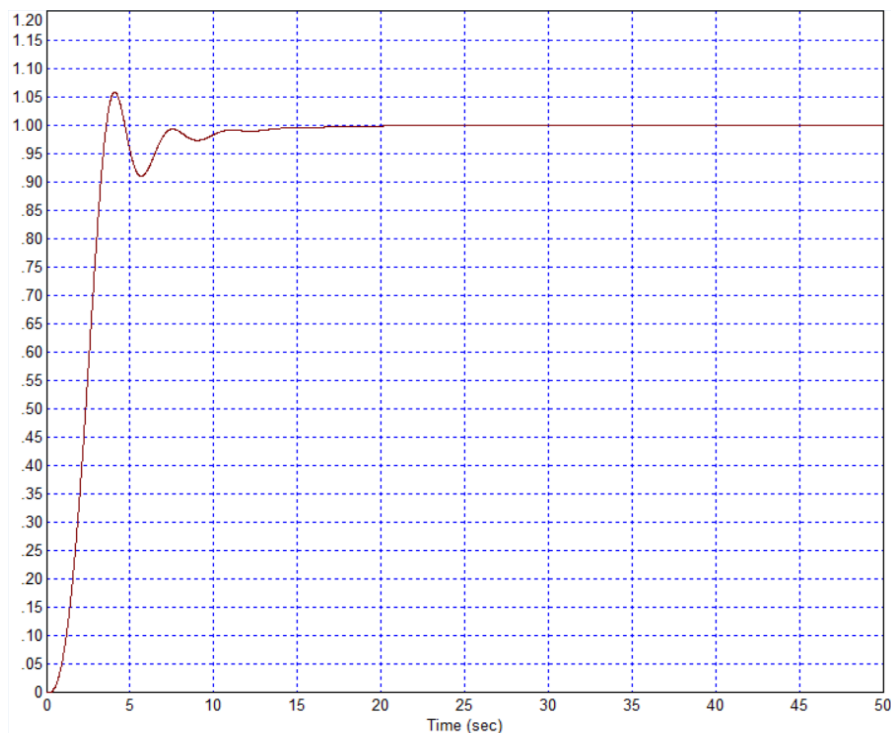


Рис. 3. Переходные процессы в системе по структуре *Рис. 1* при коэффициентах регулятора, оптимизированных для значения $a_1 = 0,2$, в случае, когда фактическое значение этого параметра $a_1 = 2$

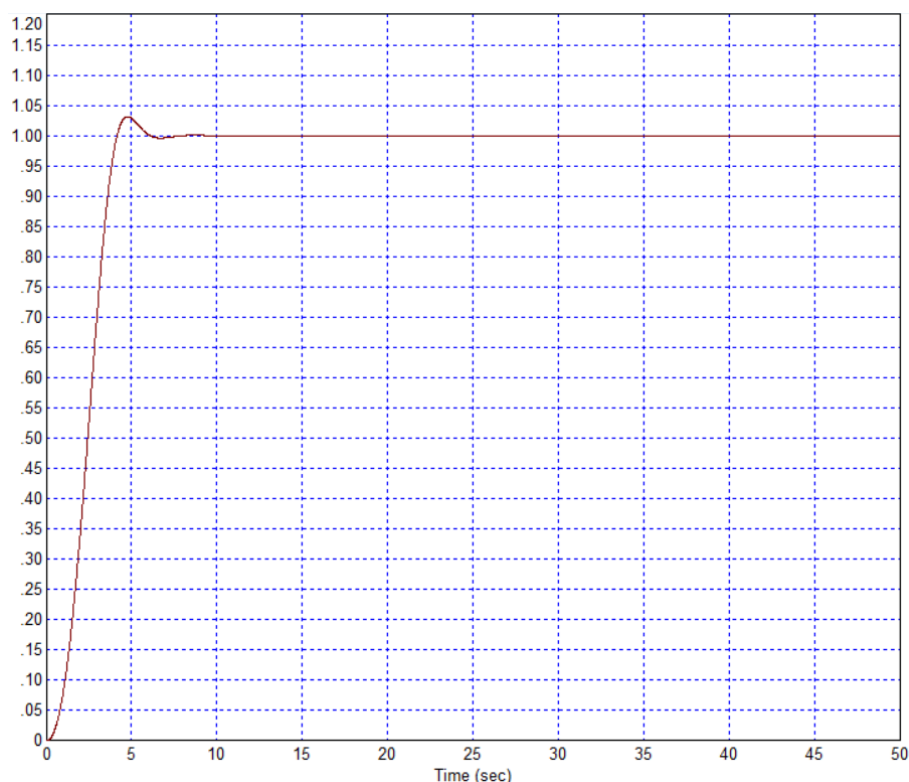


Рис. 4. Переходные процессы в системе по структуре Рис. 1 при коэффициентах регулятора, оптимизированных для значения $a_1 = 2$, в случае, когда фактическое значение этого параметра совпадает с этим значением: $a_1 = 2$

В этом случае перерегулирование снижается до 3%. Применяя эту процедуру далее, находим коэффициенты регулятора для случая $a_1 = 5$. В результате этой процедуры получены следующие коэффициенты регулятора: $k_p = 1,011$, $k_i = 0,977$, $k_D = 7,28$. В переходном процессе перерегулирование составляет приблизительно 2,5%. Далее для того, чтобы оценить, насколько процесс остаётся удовлетворительным при различных амплитудах входного ступенчатого скачка, необходимо осуществить серию экспериментов при разных амплитудах, поскольку объект является нелинейным, а значит и полученная система обязательно является нелинейной. Процессы при амплитуде входного сигнала от 0,2 до 1,0 с шагом 0,2 показаны на Рис. 5. С уменьшением амплитуды входного сигнала в процессе постепенно возрастает перерегулирование. С дальнейшим снижением амплитуды возникает вторая волна колебаний, что приводит к увеличению переходного процесса. Процессы при амплитуде входного сигнала от 1,0 до 1,4 с шагом 0,2

показаны на Рис. 5. Если же амплитуда входного сигнала увеличивается до 1,5, то система становится неустойчивой, соответствующий неустойчивый переходный процесс показан на Рис. 7.

Кроме того, если даже входной сигнал равен единице, то в случае подачи на вход обратного скачка, который возвращает задание из единичного состояния в нулевое, то обратный переходный процесс характеризуется намного более худшим качеством: в процессе имеется перерегулирование на уровне 20%, затем колебательный процесс, который затухает относительно быстро (следующее перерегулирование в 4 раза меньше, оно составляет 5%, соответственно, третье перерегулирование пренебрежимо мало, оно равно 1,5% и так далее. Этот процесс показан на Рис. 8. Там же показана вся структура системы, включая формирователь двух ступенек, состоящий из двух отдельных формирователей ступенчатых сигналов, второй из которых содержит запаздывание на 40 с.

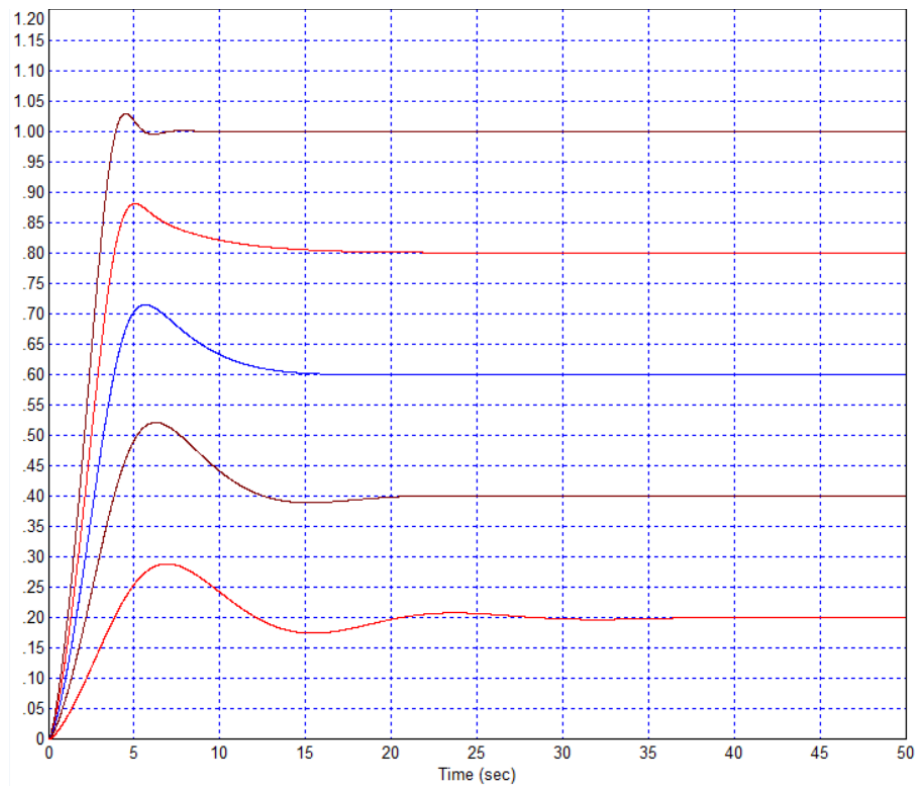


Рис. 5. Процессы при амплитуде входного сигнала от 0,2 до 1,0 с шагом 0,2 (значение задания легко установить по установившемуся значению процессов, которое совпадает с заданием), при этом $a_1 = 5$

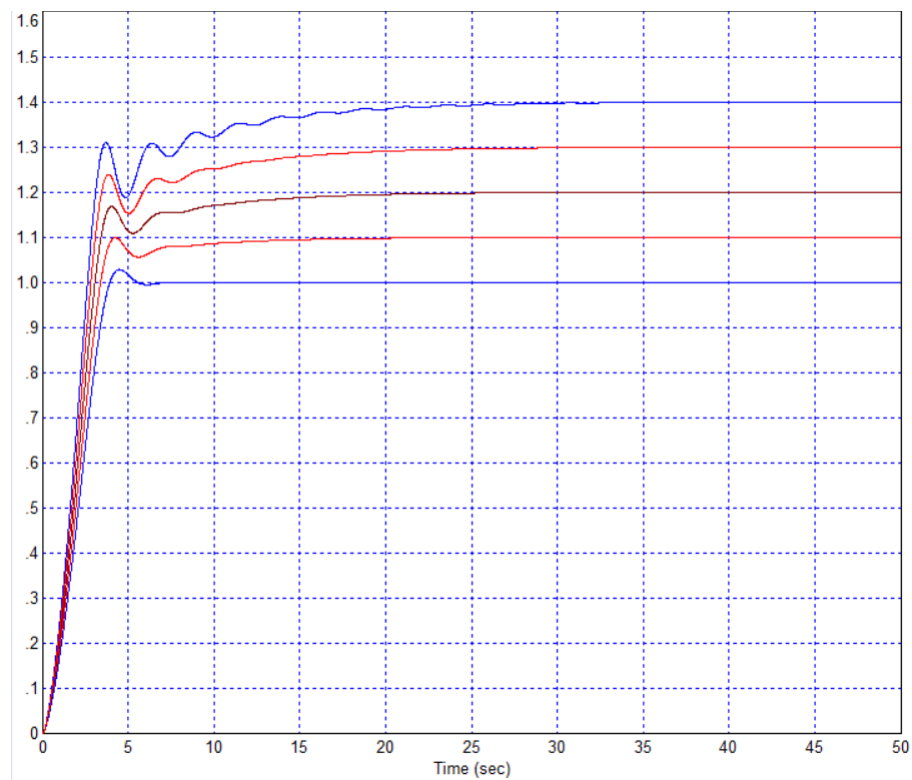


Рис. 6. Процессы при амплитуде входного сигнала от 1,0 до 1,4 с шагом 0,2 (значение задания легко установить по установившемуся значению процессов, которое совпадает с заданием), при этом $a_1 = 5$

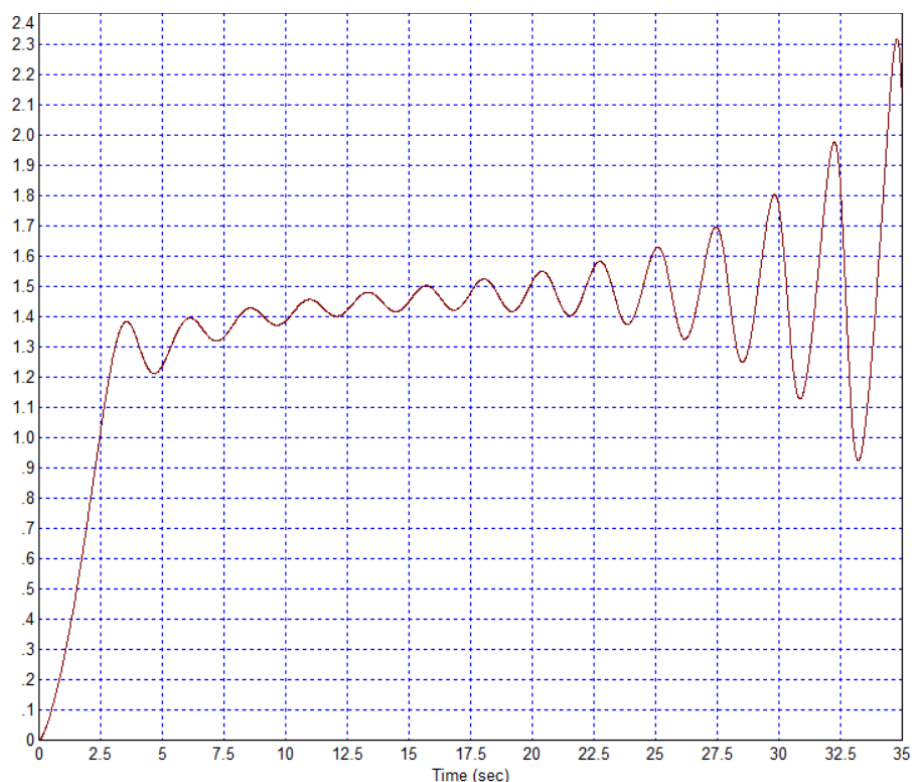


Рис. 7. Неустойчивый процесс при амплитуде входного сигнала 1,5 при $a_1 = 5$

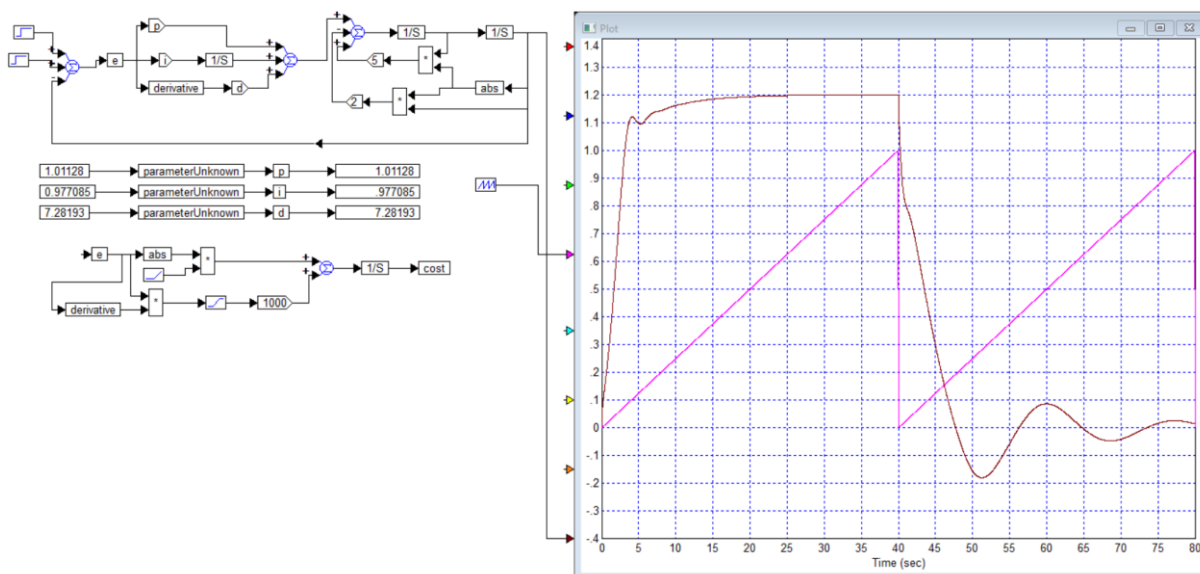


Рис. 8. Структура с моделированием двух единичных ступенчатых скачков, прямого и обратного; здесь же показан переходный процесс в этом случае при использовании регулятора, рассчитанного по единственному скачку; синяя линия на графике показывает пилообразный сигнал, который предлагается использовать вместо линейно нарастающего сигнала в следующей стадии оптимизации при использовании сигнала с двумя скачками, в моменты 0 и 40 с

ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА

Как отмечено в предыдущей статье [2], при синтезе регулятора для нелинейного объекта может оказаться, что полученная система будет неустойчива в малом, то есть в том случае, если входной сигнал чрезвычайно мал, близок к нулю. Эта ситуация не выявляется, если входной сигнал строго равен нулю, она лучше всего

выявляется, если сигнал из ненулевого состояния становится нулевым. По этой причине рекомендуется в качестве тестового сигнала брать не единичное ступенчатое воздействие, а сумму двух воздействий, одно из которых – положительный скачок, а другое – отрицательный скачок той же амплитуды. Сформируем такой сигнал так, чтобы запаздывание второго сигнала составляло 40 с, это необходимо, чтобы отклик от первого скачка

почти полностью закончился до начала второго скачка. При этом вместо множителя t в уравнении (3) используем пилообразный сигнал, который линейно нарастает от нуля до 1 на интервале от нуля до 40 с, после чего резко становится нулевым и снова линейно нарастает с таким же наклоном до этой же величины на второй части интервала от 40 с до 80 с. В результате этой процедуры получены следующие коэффициенты регулятора: $k_p = 2,57$, $k_i = 0,691$, $k_D = 7,316$. Полученный процесс показан на Рис. 9.

Для верификации и валидации полученного результата следует построить семейство переходных процессов. Рис. 10 представляет такое семейство при скачках на входе с амплитудой от 0,1 до 1,2 с шагом 0,1.

Рис. 11 демонстрирует семейство переходных процессов при скачках на входе с амплитудой от 0,01 до 0,1 с шагом 0,01.

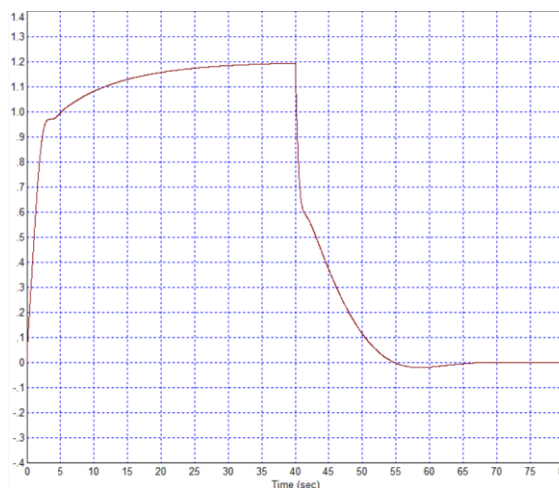


Рис. 9. Переходный процесс в ответ на два скачка амплитудой +1 и -1 при $a_1 = 5$ и при коэффициентах $k_p = 2,57$, $k_i = 0,691$, $k_D = 7,316$

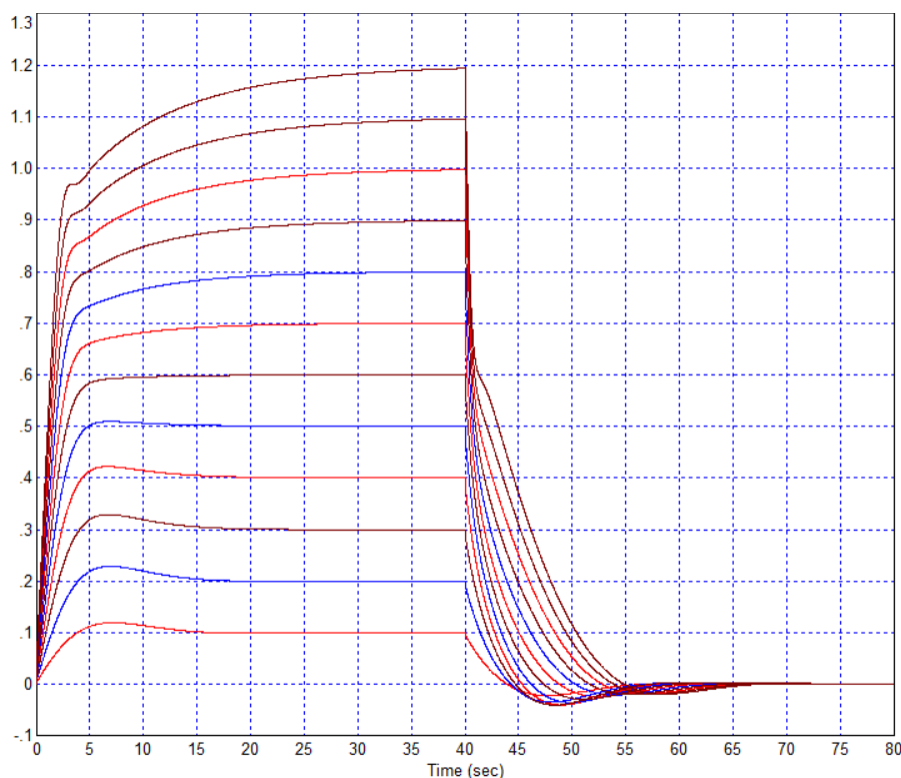


Рис. 10. Семейство переходных процессов при скачках на входе с амплитудой от 0,1 до 1,2 с шагом 0,1

Как видим, уменьшение амплитуды входного сигнала не изменяет переходный процесс катастрофически. Таким образом, амплитуда сигнала изменяется в 60 раз. Дальнейшее снижение амплитуды в область меньших значений возможно без ограничений. Это проверено экспериментально, это же самое можно было бы обосновать и теоретически, поскольку при малых сигналах нелинейная обратная связь очень резко ослабляется, пропорционально квадрату уменьшения амплитуды. С увеличением амплитуды всё намного сложнее, поскольку положительная обратная связь не

только убывает пропорционально квадрату амплитуды, но и возрастает пропорционально квадрату амплитуды. Если амплитуда не превышает 1,4 единицы, процесс остается устойчивым. При амплитуде, равной 1,6, переходный процесс начинает раскачиваться ещё до достижения равновесного состояния, в дальнейшем амплитуда возрастает, если бы не было обратного скачка, то амплитуда возрастала бы и дальше. По этой причине необходимо исследовать также и процесс при скачке, равном 1,5 единицы. Для проверки достаточно увеличить время моделирования, устранив

обратный скачок. Моделирование показывает, что в этом случае постепенно развиваются

колебания, то есть такой переходный процесс тоже неустойчивый, как показано на Рис. 14.

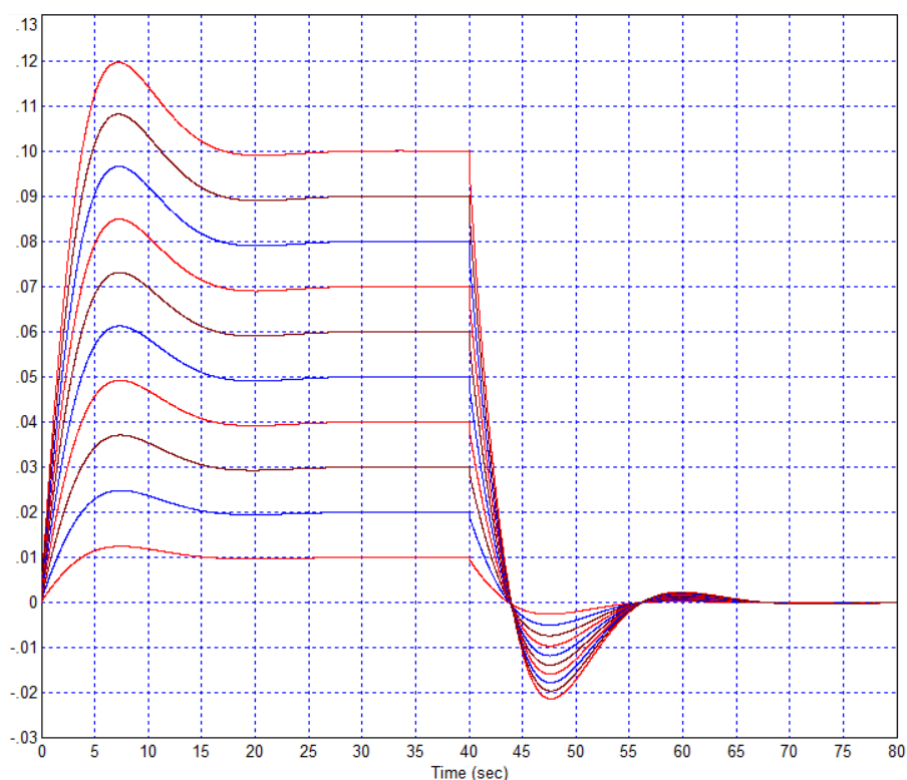


Рис. 11. Семейство переходных процессов при скачках на входе с амплитудой от 0,01 до 0,1 с шагом 0,01

При амплитуде скачка в 1,45 единиц переходный процесс остается стабильным даже на интервале в 200 с, но при скачке в 1,46 единиц на этом интервале уже можно при укрупненном рассмотрении графика заметить начало развития колебательного процесса, а при амплитуде 1,47 единиц это колебание уже по истечении времени 100 с становится заметным, а далее оно уже очевидно. Поэтому целесообразно проверить, насколько можно доверять предположению о том, что при скачке в 1,4 единицы система остается устойчивой не только на протяжении того времени, когда осуществлялось моделирование, а в принципе, «навсегда». Мы промоделировали процесс на интервале до 2000 с, склонности к колебаниям не выявлено. Кроме того, мы округлили все коэффициенты регулятора до трех значащих цифр, а после этого

– всего лишь до двух значащих цифр. Это также не вызвало колебаний в процессе. Это доказывает, что рассчитанный регулятор для входных сигналов в указанном диапазоне является достаточно грубым, даже чрезмерно, поскольку две значащих цифры в коэффициентах регулятора – это весьма грубое округление, оставить три значащих цифры вполне было бы оправданным. Далее мы попробовали увеличить коэффициенты регулятора на 10%, переходный процесс почти не изменился, затем мы уменьшили коэффициенты на 10%, переходный процесс стал неустойчивым. Следовательно, коэффициенты рассчитаны обоснованно, соблюдать результат расчета при реализации регуляторов необходимо с погрешностью не более 1% необходимо, рекомендуется с погрешностью не более 0,2%.

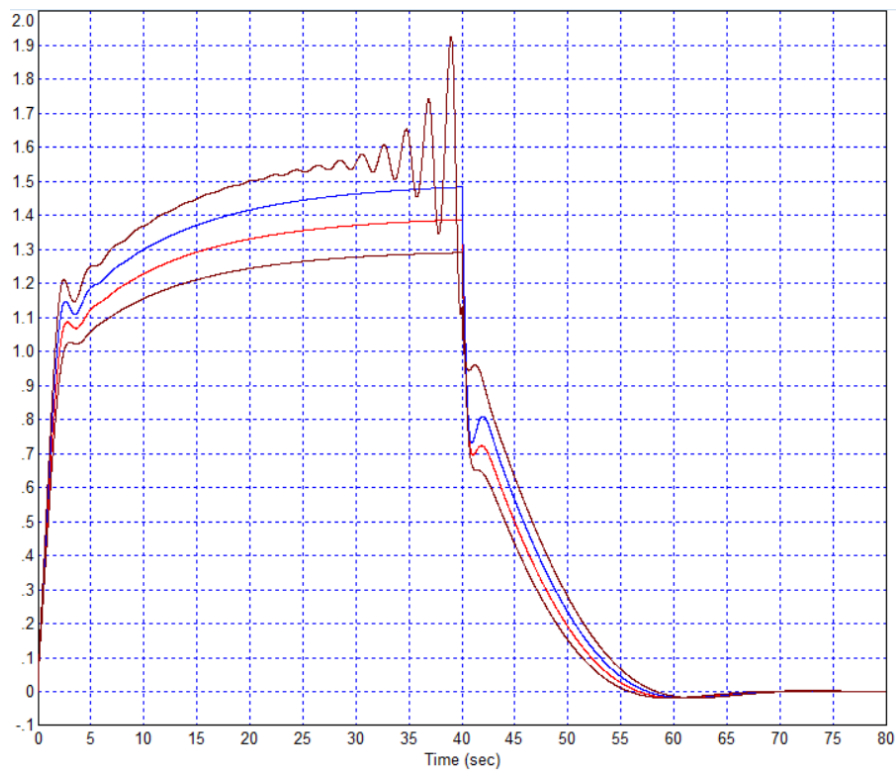


Рис. 15. Переходные процессы при амплитудах входного сигнала, равных 1,3; 1,4; 1,5 и 1,46

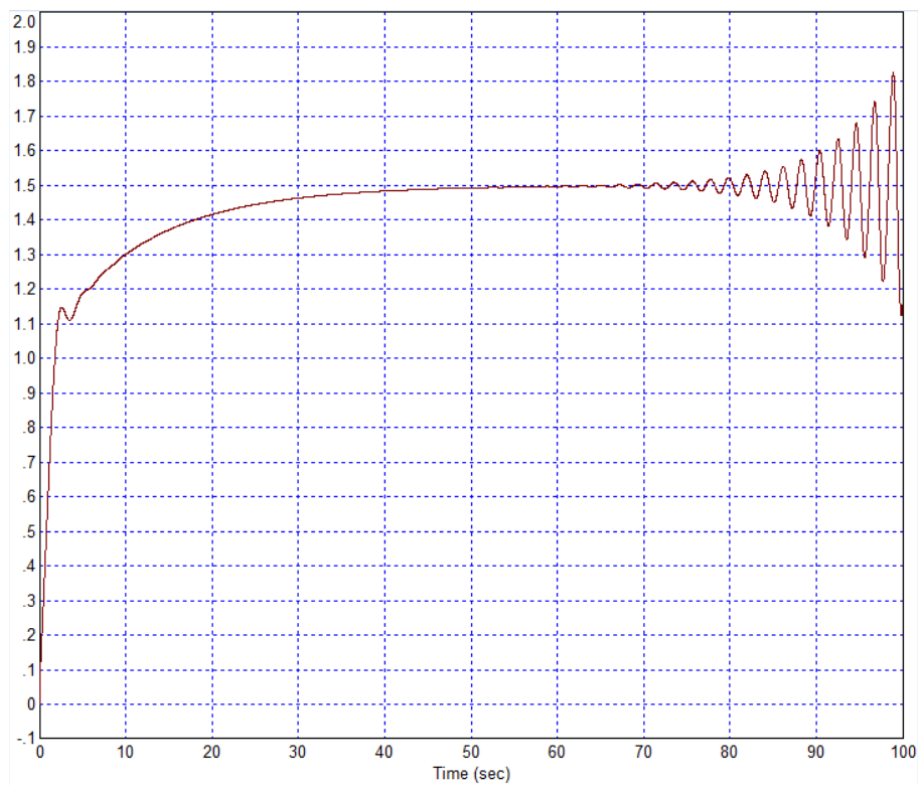


Рис. 15. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала, равной 1,45 на увеличенном интервале моделирования

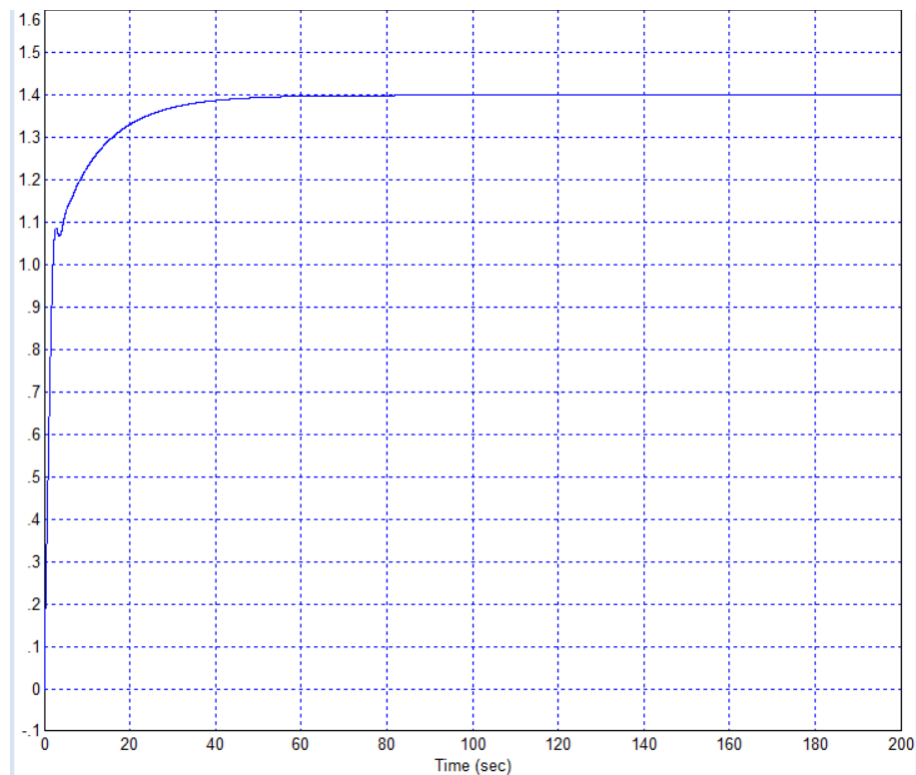


Рис. 16. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала, равной 1,4 на увеличенном интервале моделирования

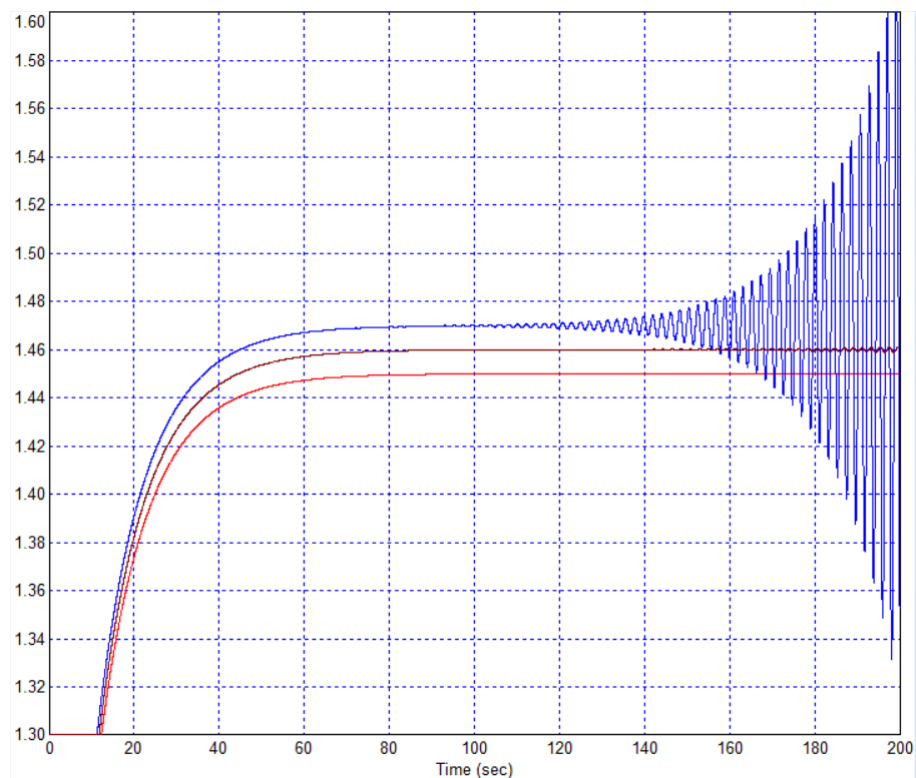


Рис. 15. Переходные процессы при амплитудах входного сигнала, равных 1,45; 1,46 и 1,47

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные переходные процессы демонстрируют, что качество скачков при нарастании

входного сигнала и при снижении его обратно к нулевому значению характеризуется не совпадающим по характеристикам набором параметров качества. Тем не менее, в диапазоне входных

сигналов от 0,01 до 1,4 качество переходных процессов вполне приемлемое.

Данная статья предлагает метод проектирования регулятора в том случае, когда обычная процедура численной оптимизации не приводила к успеху, но итеративная процедура, начиная с более простой задачи, с использованием результата в качестве набора стартовых значений для более сложной задачи, позволило успешно применить метод численной оптимизации и получить эффективный последовательный ПИД-регулятор.

Статья продемонстрировала, насколько важна верификация и валидация полученных результатов путем получения семейства важнейших откликов при различных вариантах входных сигналов: требуется изменять амплитуду, проверяя переходный процесс, кроме того, для того, чтобы убедиться, что процесс является глобально устойчивым, рекомендуется в сомнительных случаях существенно (в десять и более раз) увеличивать время моделирования, а также в качестве альтернативы можно рекомендовать изменение коэффициентов рассчитанного регулятора на величину $\pm 0,1\%$ – обязательно, а также на величину $\pm 1\%$ – желательно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. Асет, М.Е. Мансурова, В.А. Жмудь. Управление нелинейным объектом со многими нелинейными обратными связями. Автоматика и программная инженерия. 2022. 2 (40). С. 70–86.
- [2] В.А. Жмудь. Тестирование регуляторов по методу локализации на их эффективность. Автоматика и программная инженерия. 2022. 2 (40). С. 56–70.
- [3] Жмудь В. А. Моделирование замкнутых систем автоматического управления: учеб. пособие для академического бакалавриата / В. А. Жмудь. - 2-е изд., испр. и доп. Москва: Юрайт, 2017. 126 с. ISBN 978-5-534-03410-3.
- [4] Жмудь В. А. Системы автоматического управления высшей точности: учеб. пособие / В. А. Жмудь, А. В. Тайченачев. – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2016. 133 с. ISBN 978-5-4437-0603-0.
- [5] Автоматизированное проектирование систем управления.: учеб. пособие / Новосибирск, 2012: учеб.-метод. пособие / В. А. Жмудь.: НГТУ, 2012. - 72 с.
- [6] Жмудь В. А. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического

управления в программе VisSim.: учеб. пособие / Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012.: учеб. пособие / В. А. Жмудь.: НГТУ, 2012. - 124 с.

- [7] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. - 126 p
- [8] Жмудь В. А. Численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim: новые структуры и методы: монография / В. А. Жмудь. – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2016. - 252 с. ISBN 978-5-7782-3062-7.
- [9] Востриков А.С., Воевода А.А., Жмудь В.А. Эффект понижения порядка системы при управлении по методу разделения движений. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 3 (21). С. 3-13. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17425168>
- [10] Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters. Zhmud V.A., Reva I.L., Dimitrov L.V. In book: Journal of Physics: Conference Series. 2017. С. 012185.
- [11] Zhmud' V.A Motions separation method for disturbances suppression in laser systems. Avtometriya. 2002. Т. 38. № 5. С. 119-126. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14965898>



Вадим Жмудь – заместитель директора АО «НИПС», доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН, старший научный сотрудник Алтае-Саянского филиала ФГБУН Геофизической службы РАН.

E-mail: oao_nips@bk.ru



Владим Михайлович Семибаламут – Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы РАН, кандидат физико-математических наук.

E-mail: wladim28@yandex.ru

Статья получена 21.07.2022

Design of PID-controller for Controlling a Non-Linear Plant with Positive Non-Linear Feedback

V.A. Zhmud^{1,2,3}, V.M. Semibalamut³

¹Novosibirsk Institute of Program Systems, Novosibirsk, Russia

²Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Altai-Sayan Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Abstract. Annotation. The most difficult to control are non-linear objects, among them the most complex are objects with non-linear feedbacks, in this class of objects the most complex are those objects in which these non-linear feedbacks are positive. This means that each deviation from the equilibrium state in this object increases additionally due to the action of feedbacks, provoking an avalanche-like process of deviation from the equilibrium state with increasing speed. Such a process can develop to very large values, which are limited only by the physical possibilities of forming the maximum output deviation from equilibrium, which, when modeling or analytically calculating the output state, gives an infinitely increasing value. Some models of objects of this class can be so complex that the solution of the control problem can be carried out only by the most efficient of all known methods, which consists in creating pseudo-local stabilizing feedbacks in addition to the traditional PID controller. If we do not take into account this method, which can also have its drawbacks, and focus only on the traditional scheme of a sequential PID controller, then very little is known about the design methods for such a controller. The most effective method is numerical optimization in simulation, however, the first experiments with one of these simulation experiments ended in failure. This article reveals the reasons for this failure and proposes a method for overcoming this failure, the effectiveness of solving the problem in this way is confirmed by its successful solution.

Key words: automation, PID controller, control, nonlinear plant, numerical optimization, simulation, cost function

REFERENCES

- [1] A. Aset, M.E. Mansurova, V.A. Zhmud. Control of a Non-Linear Plant with Many Non-Linear Feedbacks. *Automatics & Software Engineering*. 2022, N 2 (40). P.71–87.
- [2] V.A. Zhmud. Testing of Effectiveness of the Regulators by the Method of Localization. *Automatics & Software Engineering*. 2022, N 2 (40). P.55–69.
- [3] Zhmud V. A. Modelirovaniye zamknutykh sistem avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobiye dlya akademicheskogo bakalavriata / V. A. Zhmud'. - 2-ye izd., ispr. i dop. - Moskva: Yurayt, 2017. 126 s. ISBN 978-5-534-03410-3.
- [4] Zhmud V. A. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya vysshey tochnosti: ucheb. posobiye / V. A. Zhmud', A. V. Taychenachev. – Novosibirsk.: Izd-vo NGU, 2016. 133 s. ISBN 978-5-4437-0603-0.
- [5] Avtomatizirovannoye proyektirovaniye sistem upravleniya.: ucheb. posobiye / Novosibirsk, 2012: ucheb. - metod. posobiye / V. A. Zhmud': NGTU, 2012. – 72 s.
- [6] Zhmud V. A. Modelirovaniye i chislennaya optimizatsiya zamknutykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v programme VisSim.: ucheb. posobiye / Novosib. gos. tekhn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2012.: ucheb. posobiye / V. A. Zhmud': NGTU, 2012. – 124 s.
- [7] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. – 126 p
- [8] Zhmud V. A. Chislennaya optimizatsiya zamknutykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v programme VisSim: novyye struktury i metody: monografiya / V. A. Zhmud. – Novosibirsk.: Izd-vo NGTU, 2016. - 252 s. ISBN 978-5-7782-3062-7.
- [9] Vostrikov A.S., Voyevoda A.A., Zhmud' V.A. Effekt ponizheniya poriadka sistemy pri upravlenii po metodu razdeleniya dvizheniy. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2005. № 3 (21). S. 3-13. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17425168>
- [10] Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters. Zhmud V.A., Reva I.L., Dimitrov L.V. В сборнике: *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. С. 012185.
- [11] Zhmud' V.A Motions separation method for disturbances suppression in laser systems. *Avtometriya*. 2002. Т. 38. № 5. С. 119-126. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14965898>



Vadim Zhmud – Vice-Head of NIPS, Assistant Professor, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, ILP SB RAS, Senior Researcher, Altai-Sayan Branch, Geophysical Survey RAS.
E-mail: oao_nips@bk.ru



Vladimir Semibalamut – Altai-Sayan Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, PhD.
E-mail: vladim28@yandex.ru

The paper has been received on 21/07/2022.