

## Управление нелинейным объектом со многими нелинейными обратными связями

А. Асет<sup>1</sup>, М.Е. Мансурова<sup>2</sup>, В.А. Жмудь<sup>3, 4, 5</sup>

<sup>1</sup>Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>АО «Новосибирский институт программных систем», Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup>Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы РАН, Новосибирск, Россия

*Аннотация.* Управление нелинейными объектами приобретает всё большую актуальность. Наиболее эффективен для этих целей метод численной оптимизации. Проверка результата по отклику полученной системы на единичное ступенчатое воздействие, часто практикуемое при проектировании систем управления линейными объектами, зачастую применяется и к системам управления нелинейными объектами, что является ошибкой. Данная статья демонстрирует, что даже в случае успешного управления, демонстрируемого с таким тестовым сигналом, система может обладать недостаточным качеством при обработке сигналов другой амплитуды. Поэтому необходима проверка устойчивости системы и качества переходного процесса, включая точность, перерегулирование, отсутствие колебаний в существенно более широком диапазоне сигналов задания. Показано, что результат оптимизации существенно зависит от вида и амплитуды сигналов, используемых в качестве тестового задания во время процедуры оптимизации. Выяснено, что система может оказаться неустойчивой в малом, т.е. при малых ненулевых сигналах система может оказаться склонной к колебаниям. Также показано, что система, которая по многим проверочным сигналам демонстрирует себя как достаточно высококачественная, может проявлять недопустимо плохое качество, включая автоколебания большой амплитуды в качестве отклика на сигнал, который сначала скачком нарастает из нулевого состояния в ненулевое, а затем скачком возвращается обратно в нулевое состояние. Впервые предложено использовать именно такой наиболее сложный для некоторых видов нелинейных систем сигналов в качестве тестового на время выполнения процедуры численной оптимизации. Показано, что в этом случае получается наилучшая из возможных настройка ПИД-регулятора, такая система существенно подавляет даже шумы со средним нулевым, тогда как система, оптимизируемая по ступенчатому скачку, в таких условиях переходит в состояние автоколебаний с существенной по величине амплитудой.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Управление объектами с помощью отрицательной обратной связи актуально во многих областях науки и техники, поскольку лишь такое обеспечивает высокую точность. Развитие робототехники, технологий производства, включая сложные конвейерные линии, интернета вещей и технологий умного дома и умного города ставит задачи управления все более и более сложными объектами. Задачи управления линейными динамическими объектами в целом могут быть решены очень многими способами достаточно эффективно. Для этого могут быть применены аналитические методы и численные методы. Задача управления нелинейными объектами более успешно может быть решена именно численными методами, поскольку применение аналитических методов невозможно, либо требует таких кардинальных упрощений математической модели, что решение такой излишне упрощенной задачи не имеет никакого прикладного значения, поскольку рассчитанные регуляторы в случае их использования с реальной моделью, дают совершенно не те свойства системы, которые ожидаются в результате проектирования.

Поэтому проектирование регуляторов для нелинейных моделей целесообразно осуществлять именно методами численной оптимизации.

Даже в случае использования методом численной оптимизации результат моделирования может не совпасть с фактическим результатом использования рассчитанного регулятора вследствие того, что какие-то важные особенности модели реального объекта не были учтены при создании его математической модели, которая далее применялась для численной оптимизации. Особенно важно учитывать все особенности модели в тех случаях, когда объект существенно не линеен.

К существенным характеристикам нелинейности следует отнести, прежде всего, неоднозначные характеристики, такие как гистерезис, а также характеристики типа «зона нечувствительности». Ещё один вид существенных нелинейностей – это нелинейные обратные связи. Этот вид также делает объект весьма склонным к возбуждению, в некоторых случаях модель объекта может оказаться настолько сложной, что управлять таким объектом не представляется возможным с

использованием известных методов проектирования регуляторов.

Все же можно назвать примеры таких математических моделей объектов, которые позволяют получить достаточно высококачественный переходный процесс, однако, вследствие нелинейности, такой процесс обеспечивается далеко не для всех вариантов управляющих или возмущающих воздействий.

Данная статья исследует зависимость переходных процессов от амплитуды входного сигнала и предлагает метод отыскания удовлетворительного решения. Демонстрация предлагаемого метода осуществлена на примере объекта, взятого из литературного источника, в котором осуществлены некоторые модификации его модели, поскольку без таких модификаций объект остается неуправляемым, как показало исследование. Во всяком случае, на современном этапе развития теории автоматического управления примеров эффективного управления таким объектом, которые не были бы фейком и могли бы быть подтверждены.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим нелинейный объект из публикации [1]

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

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 из 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,  $a_1 = 5$ ,  $a_2 = 2$ . Выбор конкретных значений коэффициентов не столь важен, поскольку если метод работает для одного набора параметров модели объекта, его можно попытаться применить и для другого набора объектов. Мы не ставим задачу управления нестационарным объектом или объектом с неточно известными параметрами, поскольку указанный вид уравнения уже содержит две нелинейности, каждая из которых относится к классу достаточно сложных, поскольку это – нелинейная обратная связь.

Ставится задача проектирования такого регулятора, который обеспечит как можно более качественную систему автоматического управления.

#### УТОЧНЕНИЯ К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ

Под понятием качества понимаются: устойчивость, быстродействие, малое перерегулирование, отсутствие колебаний, соответствие диапазона входных сигналов требуемому. В случае нелинейного объекта даже самое последнее в списке требований не является менее важным, чем любое другое требование. Если все показатели качества переходного процесса будут обеспечены, например, только при подаче единичного ступенчатого скачка, это ещё не означает, что задача управления решена. Такое тестирование допустимо только в том случае, если объект линеен, для линейных объектов справедлив принцип суперпозиции, и, следовательно, если входной сигнал уменьшить или увеличить с некоторым коэффициентом, в том числе и отрицательным, то все сигналы на выходе изменятся с тем же коэффициентом, поэтому построение семейства переходных процессов не имеет никакого смысла.

Многие студенты и аспиранты вследствие того, что основная часть практических заданий по теории автоматического управления связана с задачами управления линейными объектами, привыкают к тому, что отклик системы на единичный ступенчатый скачок является достаточной демонстрацией соответствия полученному решению поставленной задаче, однако, это не так, для нелинейных систем требуется также исследование диапазона применимости данного решения.

#### МЕТОД РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

В качестве метода решения используем метод численной оптимизации при моделировании переходных процессов в программе *VisSim*. Обоснование для этого выбора достаточно детально приведены в публикациях [2–7].

Будем решать задачу в структуре с единичной отрицательной обратной связью и с ПИД-регулятором в прямой ветви. Передаточная регулятора в этом случае имеет следующий вид:

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

Здесь  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_D$  – коэффициенты пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего трактов,  $s$  – оператор преобразования Лапласа. Передаточная функция (2) связывает сигнал ошибки и формируемый сигнал управления, который необходимо подавать на вход объекта. Сигнал ошибки представляет собой разницу между сигналом задания и выходным сигналом. Структура такой системы показана на *Рис. 1*.

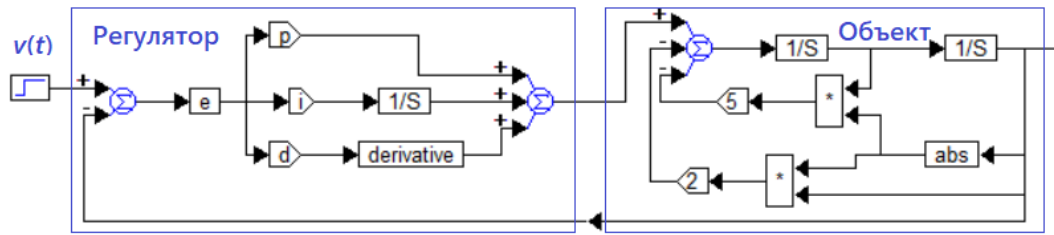


Рис. 1. Структура предлагаемой системы управления:  $p$ ,  $i$ ,  $d$  – упрощенные обозначения коэффициентов с такими индексами, соответственно, т.е.  $k_p$ ,  $k_I$ ,  $k_D$ ,  $derivative$  – блок вычисления производной,  $1/S$  – блок вычисления интегратора,  $\Sigma$  – блок суммирования или вычитания, 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,  $abc$  – блок вычисления абсолютного значения, прямоугольники со звездочкой внутри – блоки умножения сигналов,  $e$  – сигнал ошибки

Для расчета коэффициентов регулятора используем метод, предложенный в цикле работ [2–7]. В соответствии с этим методом создадим три блока “*Parameter Unknown*” и блок “*Cost*”, а также структуру для вычисления стоимостной функции из сигнала ошибки в соответствии со следующим уравнением:

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

Здесь

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

Обоснование для выбора этой целевой (стоимостной) функции мы не приводим,

поскольку достаточное обоснование приведено в публикациях [2–7]. Полная структурная схема для реализации этой задачи оптимизации показана на Рис. 2. В результате оптимизации получены коэффициенты, которые показаны в дисплеях справа. Стартовые значения были изначально записаны генераторы констант, находящиеся слева. Получены следующие значения коэффициентом ПИД-регулятора (2):  $k_p = 46,938$ ,  $k_I = 8,16$ ,  $k_D = 10,247$ .

На Рис. 3 – Рис. 4 показаны переходные процессы в полученной системе при различных значениях входного ступенчатого скачка  $u(t)$ .

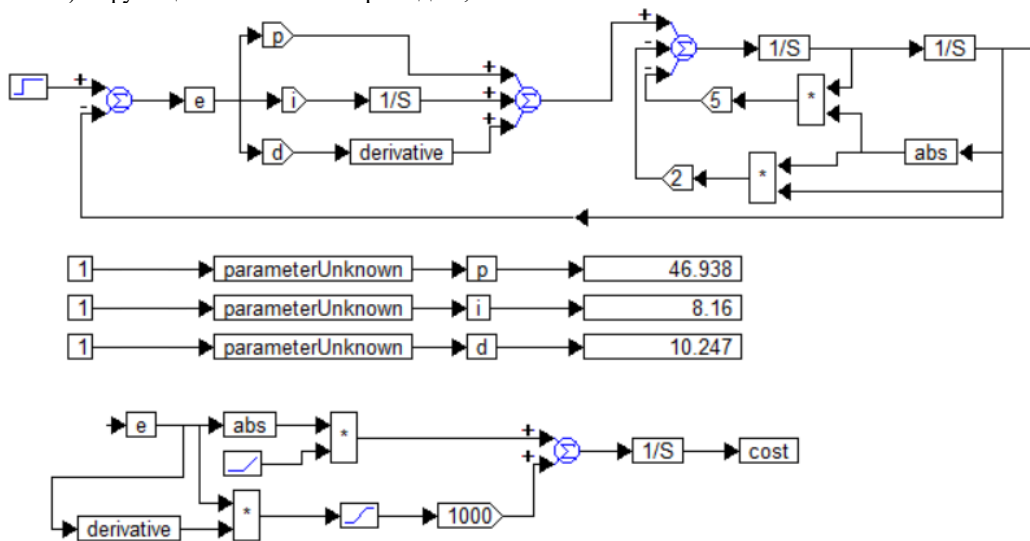


Рис. 2. Структурная схема для оптимизации регулятора (2) для объекта (1) с использованием стоимостной функции (3), (4)

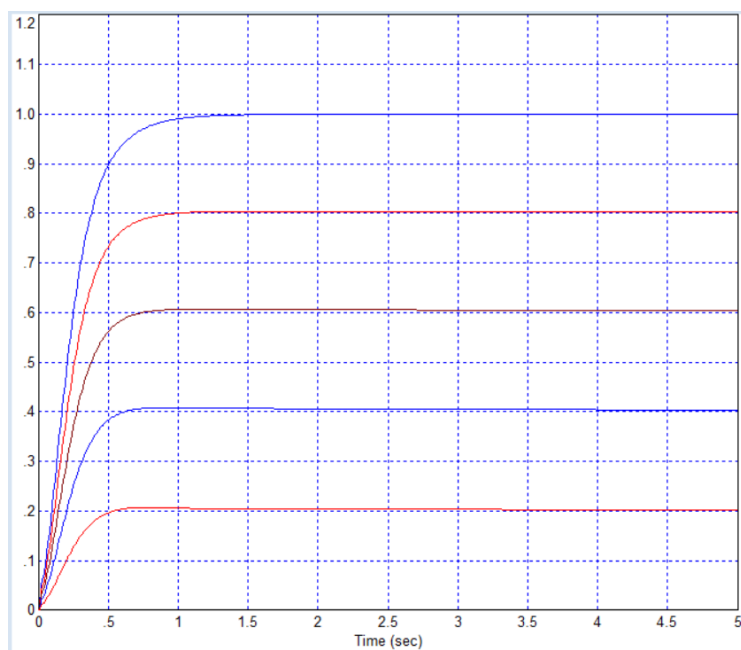


Рис. 3. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет, соответственно, 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 единицы

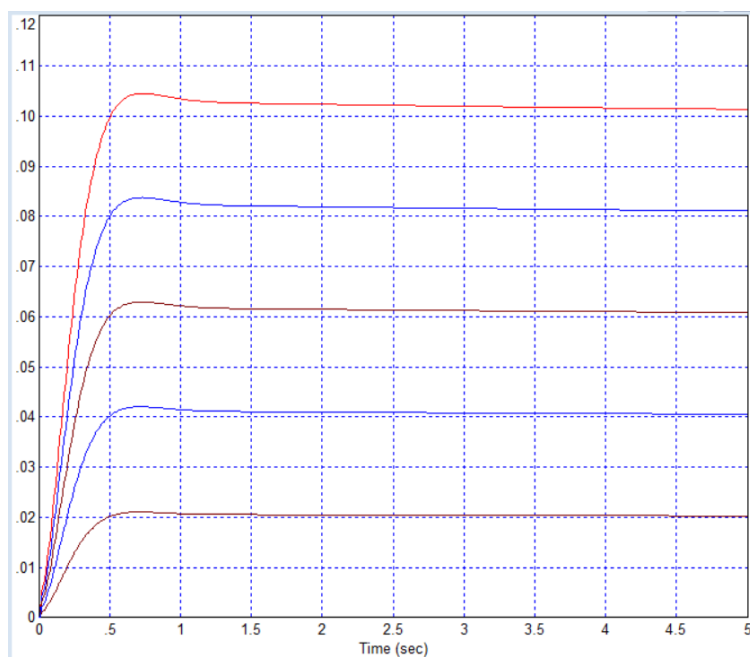


Рис. 4. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет, соответственно, 0,1; 0,08; 0,06; 0,04 и 0,02 единицы

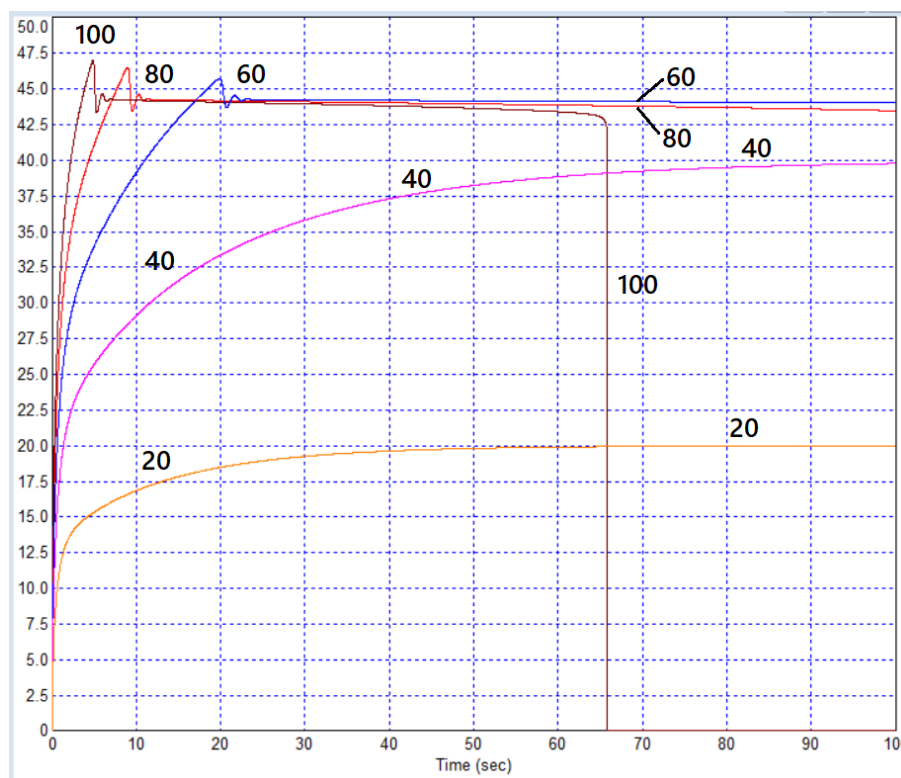


Рис. 5. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания указано рядом с графиками: 20, 40, 60, 80 и 100

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Переходные процессы при малых сигналах демонстрируют вполне приемлемое решение поставленной задачи. При увеличении амплитуды входного сигнала до величины 10 качество сигнала остается почти неизменным, но длительность переходного процесса постепенно увеличивается, а при амплитуде 20, как видим из Рис. 5, сигнал уже заметно затянут, длительность переходного процесса стала равной приблизительно 50 с, тогда как при сигналах менее 1 единицы она составляет 1,5 с. При амплитуде входного сигнала 40 единиц длительность процесса увеличивается до 100 с. При амплитуде 60 процесс уже не достигает предписанного значения (которое в этом случае, разумеется, также равно 60 единиц), сигнал достигает лишь значения около 44 единицы за время 20 с, процесс имеет некоторое перерегулирование, после чего плавно ниспадает. Эта ситуация уже не может быть названа успешным управлением. При задании 80 единиц происходит приблизительно такой же процесс, но он проходит быстрее в два раза. При задании, равном 100 единиц, процесс происходит ещё в два раза быстрее, после чего также уменьшается, а по достижении значения 41 единицы резко уменьшается, двигаясь в направлении очень большого отрицательного

значения. Во всяком случае можно утверждать, что при значении задания более 40 единиц управление объектом (1) уже не обеспечивается.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИ ДРУГОМ УРОВНЕ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Можно осуществить оптимизацию при задании входного сигнала с амплитудой в 20 единиц. Полученные значения коэффициентов регулятора в этом случае:  $k_p = 1,748$ ,  $k_I = 21,13$ ,  $k_D = 0,216$ . Переходные процессы для этого случая показаны на Рис. 6. Длительность процесса в этом случае также увеличивается при увеличении входного сигнала, но это увеличение уже не столь велико, а именно: при амплитуде 40 единиц длительность составляет 30 с, при входном сигнале в 30 единиц длительность процесса равна 20 с, при входном сигнале 20 единиц длительность равна 10 с, а при сигнале 10 единиц эта длительность также равна 10 с, но возникает небольшое перерегулирование порядка 0,5%. При уменьшении входного сигнала это перерегулирование возрастает, и уже при значении входного сигнала, равном 0,9 единиц перерегулирование достигает 50%, при этом процесс содержит большое количество колебаний около установившегося равновесного состояния, как показано на Рис. 7.

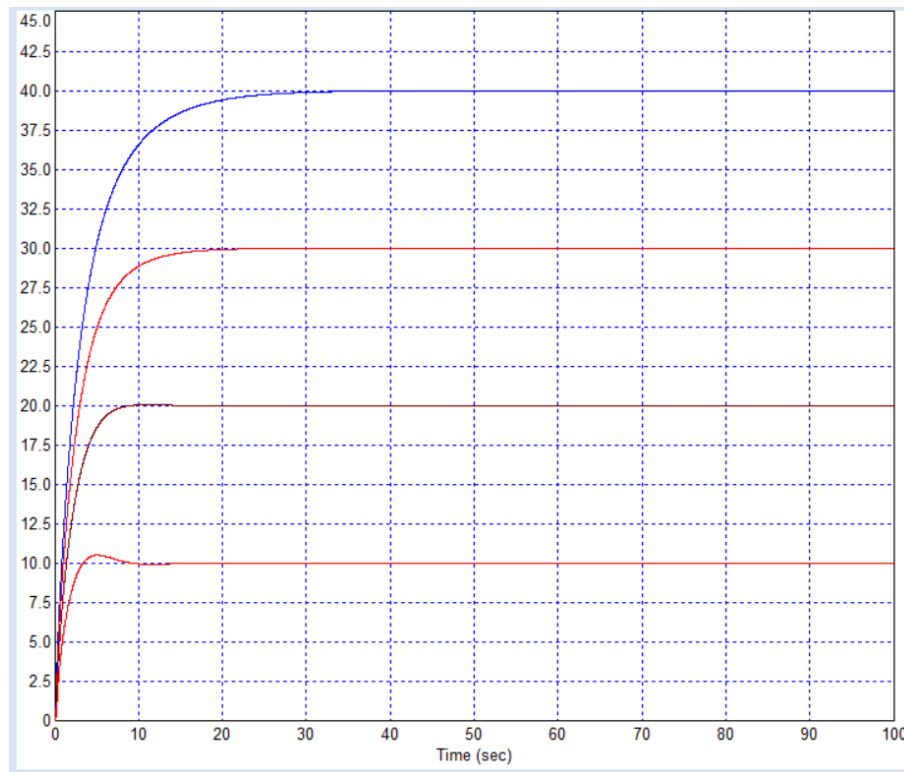


Рис. 6. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет, соответственно, 10; 20; 30 и 40 единиц

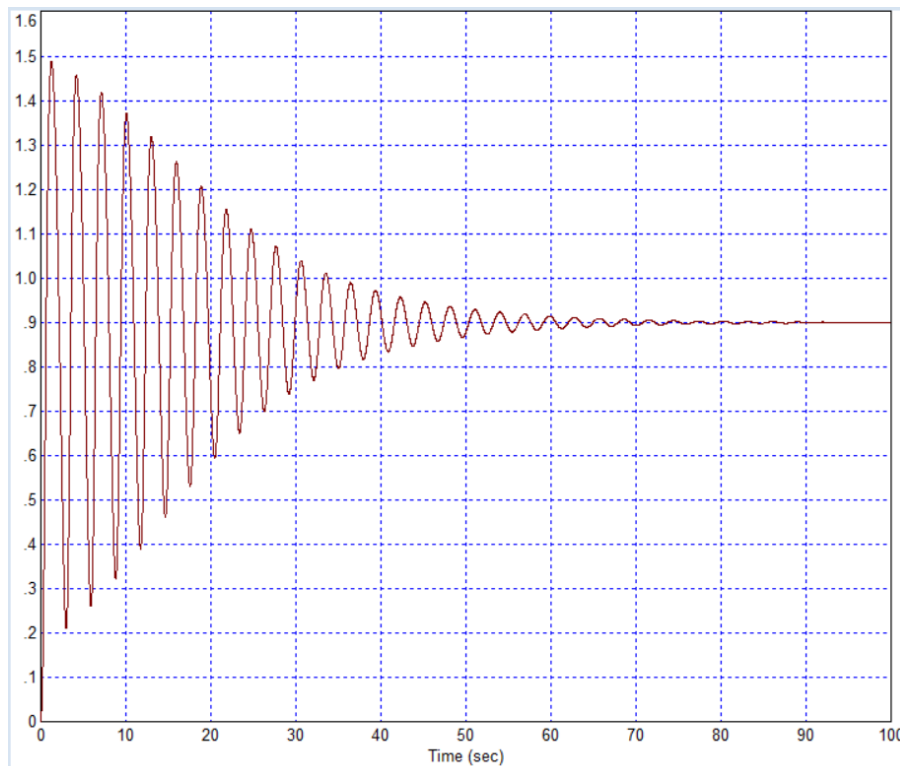


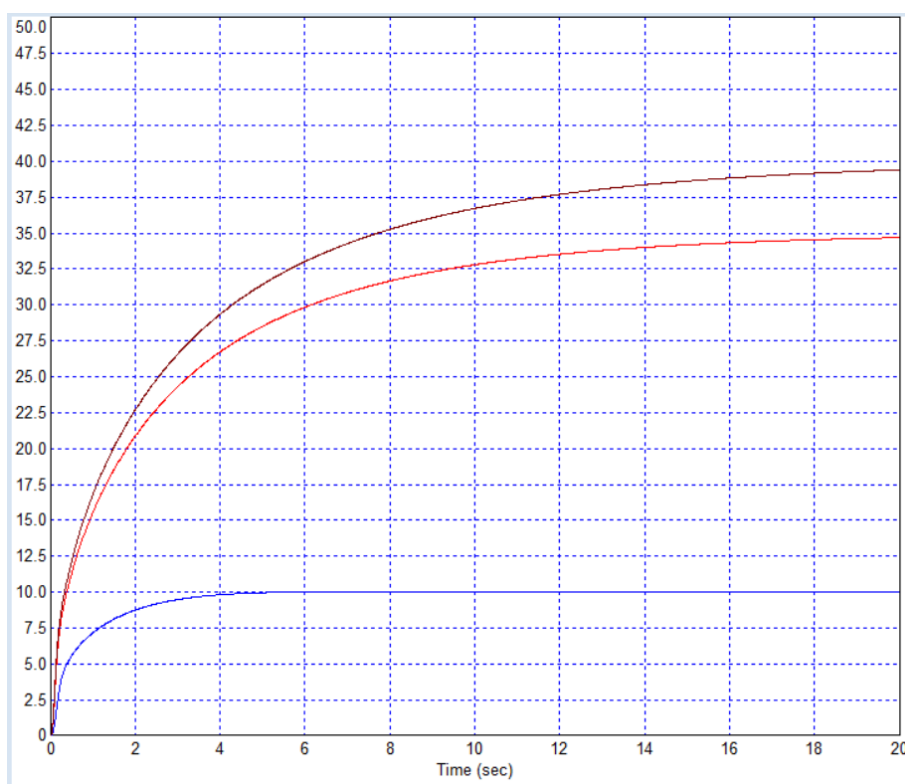
Рис. 7. Переходный процесс в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора при амплитуде входного скачка 0,9 единиц: перерегулирование 50% и большое количество колебаний, не менее двадцати хорошо различимых колебаний



### ПРОМЕЖУТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ

Выбирая промежуточное значение входного сигнала, можно получить промежуточное решение, которое будет лучшим решением именно для этого ожидаемого значения. Например, можно использовать скачок задания равный 10 единицам при оптимизации регулятора. В этом случае получены следующие коэффициенты ПИД-регулятора (2):  $k_p = 21,498$ ,  $k_i = 24,26$ ,  $k_d = -0,231$ . Переходные процессы для этого случая показаны на *Рис. 8*, где входные сигналы имеют следующие значения амплитуды: 10, 30 и 40. На *Рис. 9* показаны процессы при значениях от 5 до 10 с шагом, равным 5. Также на *Рис. 10* показаны переходные процессы при малых сигналах от 5 единиц до 1 единицы. Видим, что при снижении

сигнала до 3 единиц переходный процесс сохраняет хорошее качество, перерегулирование хотя и появляется, но оно небольшое. При амплитуде входного сигнала в 2 единицы перерегулирование уже достигает 10%, при единичном входном сигнале перерегулирование равно почти 40%. Процессы при дальнейшем снижении входного сигнала показаны на *Рис. 11*. Видим, что перерегулирование растет стремительно. При амплитуде входного сигнала 0,8 единиц перерегулирование неожиданно снизилось до 25%, далее оно растет: при амплитуде 0,6 оно составило более 58%, при амплитуде 0,4 оно составило 75%. Если входной сигнал равен 0,35, то переходный процесс превращается в серию незатухающих колебаний около равновесного состояния, как показано на *Рис. 12*.



*Рис. 8.* Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет, соответственно, 10; 30 и 40 единиц

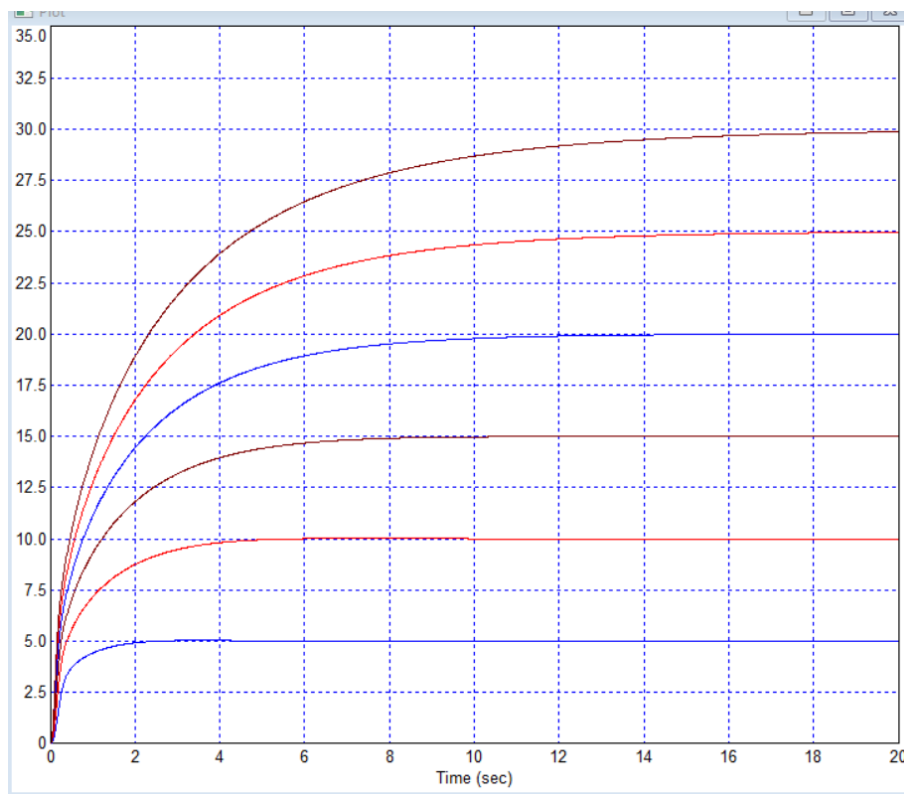


Рис. 9. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет, соответственно, 5; 10; 15; 20; 25 и 30 единиц

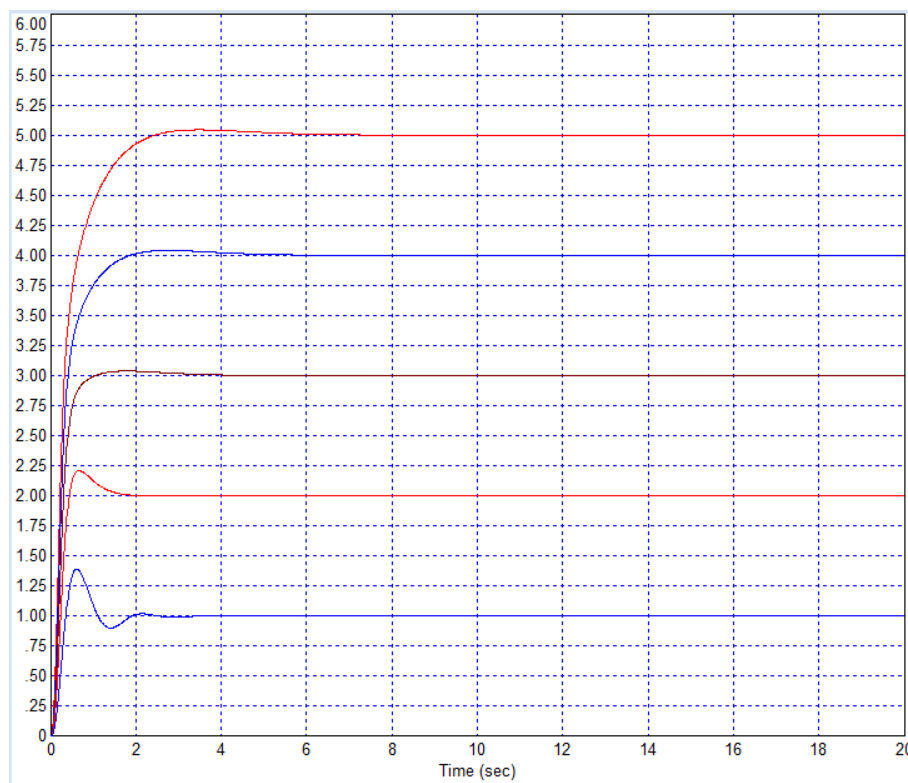


Рис. 10. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет, соответственно, 5; 4; 3; 2 и 1 единицу



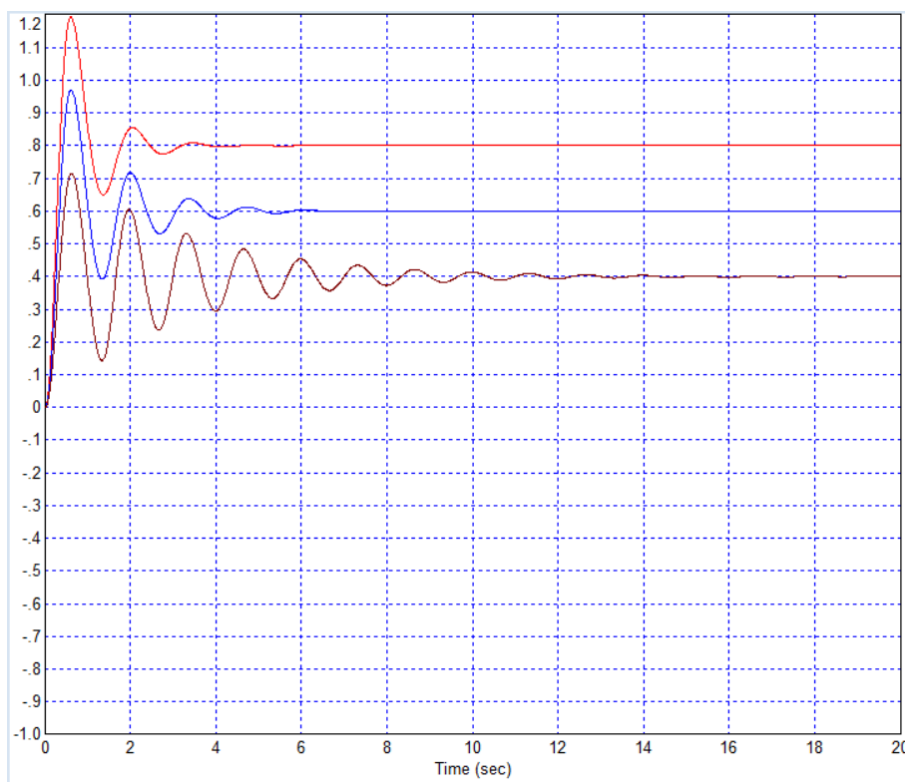


Рис. 11. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет, соответственно, 0,8; 0,6 и 0,4 единицы

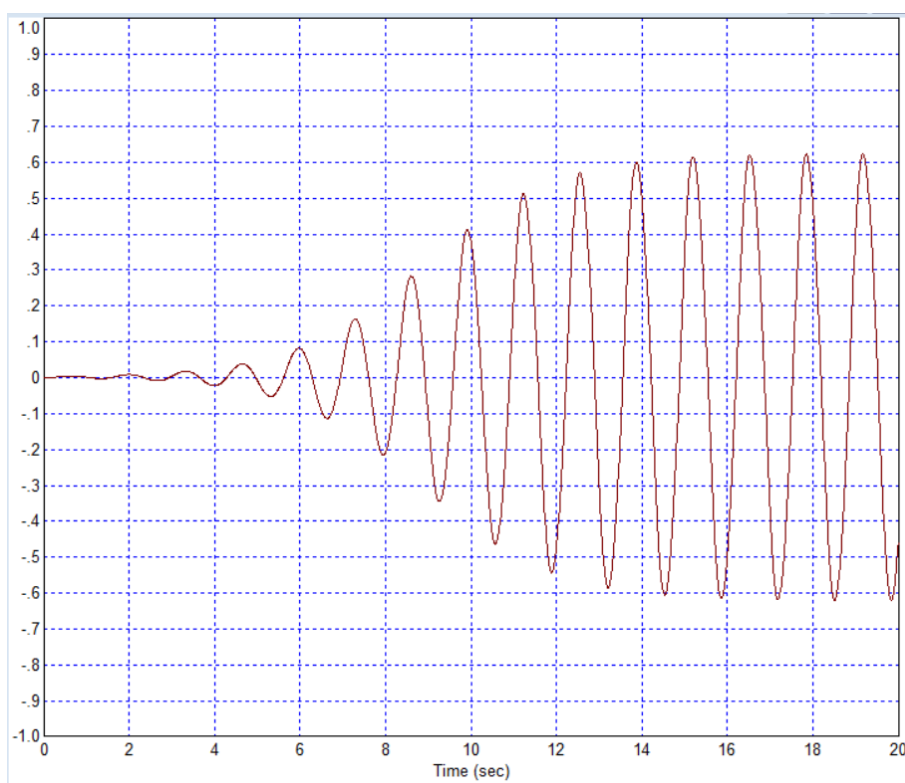


Рис. 12. Переходные процессы в системе по структуре (2) с рассчитанными коэффициентами регулятора: значение задания видно по значению установившегося состояния выходного сигнала, на данном графике амплитуда входного скачка составляет 0,35 единицы

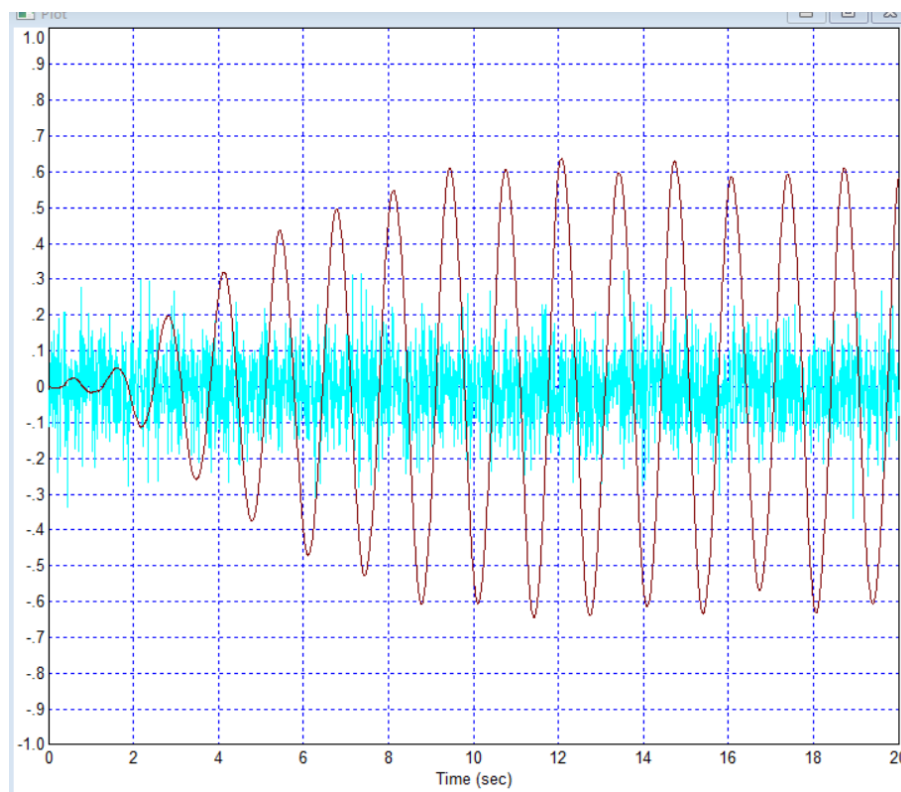
### ДЕТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТА

Решение, при котором малые входные сигналы недопустимы, вызывает обоснованные сомнения в возможности его применения. Согласно принятой в теории автоматического управления терминологии такое решение можно назвать негрубым, что является плохой характеристикой результата. Действительно, если при малых сигналах выходная величина совершает колебания, это может сделать такую систему неприменимой. Для начала, можно исследовать поведение системы при подаче на вход небольших гауссовых шумов. На *Рис. 13* и *Рис. 14* показаны переходные процессы при различных уровнях шума на входе. Из *Рис. 14* видно, что даже относительно очень малый шум приводит к колебаниям на выходе системы. Если колебания такой амплитуды не представляют проблемы, тогда, по-видимому, полученный результат можно принять, однако, все-таки эта ситуация крайне нежелательна. Далее исследуем, как данная система реагирует на входные сигналы противоположного знака.

Поскольку модель объекта симметрична относительно знака входного сигнала, ожидалось, что переходные процессы будут также симметричны. Это ожидание полностью подтвердилось, действительно знак сигнала не изменяет свойства системы ни количественно, ни качественно.

Кроме того, для более детального исследования на вход подавались последовательно ступенчатые скачки разного знака, как показано на *Рис. 15*. Система вполне успешно обрабатывает знакопеременные скачки, последовательно поступающие на её вход.

На *Рис. 16* показан переходный процесс, формируемый при последовательном поступлении двух скачкообразных с сигналов на её вход: сначала поступает сигнал амплитудой 4 единицы, а затем этот сигнал обратно приходит в нулевое состояние, т.е. добавляется скачок такой же амплитуды противоположного направления так, что в итоге на входе формируется нулевой входной сигнал. В этом случае на выходе системы устанавливаются незатухающие колебания амплитудой в 2 единицы.



*Рис. 13.* Переходный процесс в системе по структуре (2) при подаче на вход гауссова шума (шумовой сигнал показан на этом же графике)

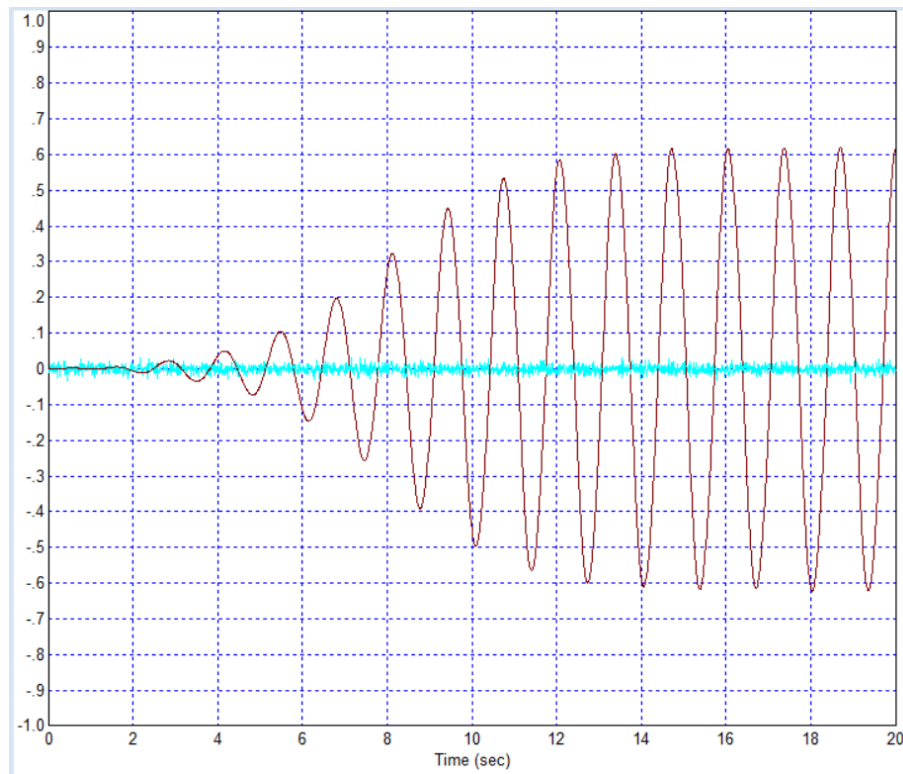


Рис. 14. Переходный процесс в системе по структуре (2) при подаче на вход гауссова шума (шумовой сигнал показан на этом же графике)

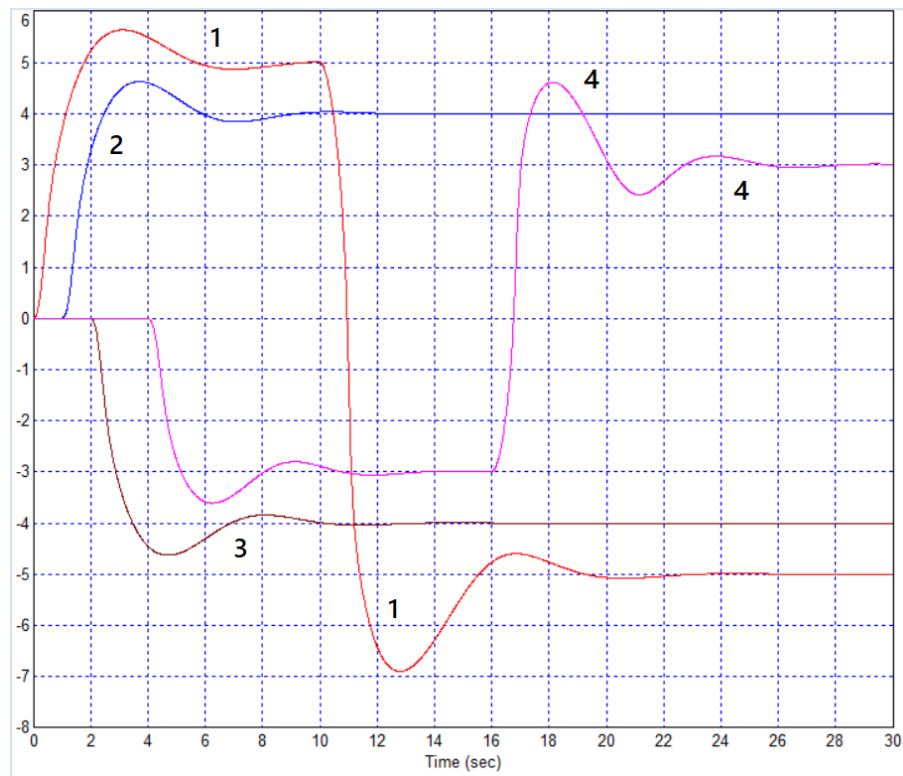


Рис. 15. Переходный процесс в системе по структуре (2) при подаче на вход скачкообразных сигналов различной полярности

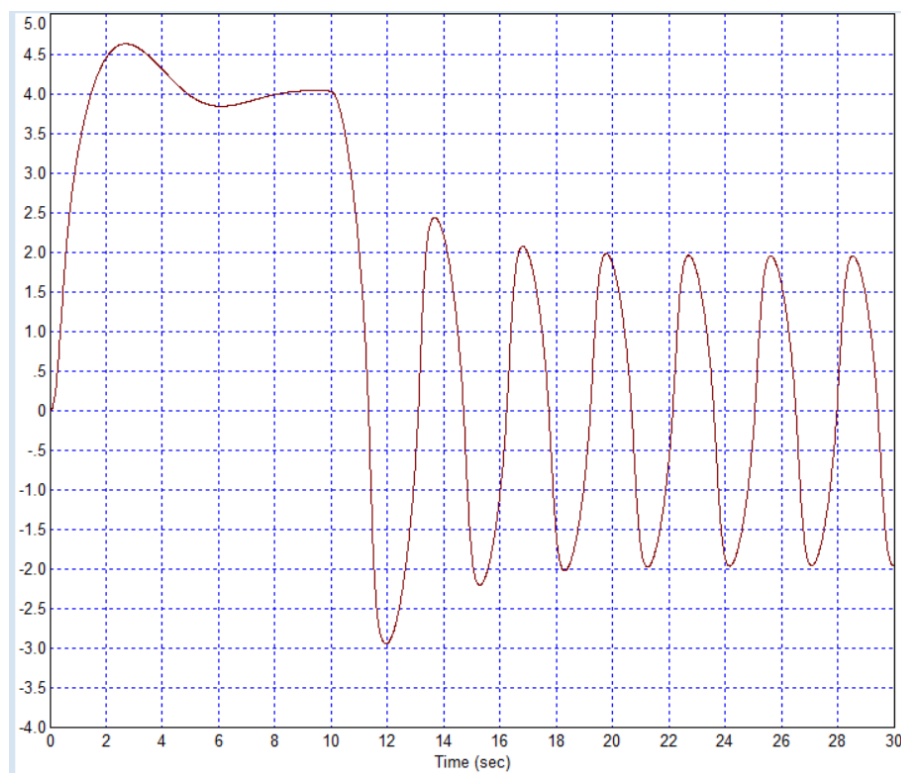


Рис. 16. Отклик системы на два последовательных скачка амплитуды 4 единицы, причем второй скачок происходит через 10 секунд после начала процесса и возвращает задание в нулевое значение

#### ДАЛЬНЕЙШЕЕ УЛУЧШЕНИЕ СИСТЕМЫ

Очевидно, что сигнал, который возвращается в нулевое значение, является наиболее нежелательным для полученной системы. По этой причине предлагается именно такой сигнал использовать в качестве тестового сигнала на последующем шаге численной оптимизации. Полученные результаты показаны на Рис. 17 и последующих Рис. 18 – Рис. 21. Согласно структуре на Рис. 17, тестовый сигнал составляет сумму двух скачкообразных воздействий, первое – положительное с амплитудой в 4 единицы, второе – отрицательное той же самой амплитудой с задержкой на 12 с.

Полученные коэффициенты регулятора такие:  $k_p = 28,879$ ,  $k_i = 14,09$ ,  $k_D = 5,826$ .

Показанные отклики демонстрируют, что в том случае, если входной сигнал не превышает 42 единицы, то система выполняет свои функции управления, хотя с ростом амплитуды сигнала время переходного процесса увеличивается. Также продемонстрировано процессами на Рис. 18, что никакие скачки в рамках оговоренной амплитуды, включая те, которые

возвращают сигнал в нулевое значение, не выводят систему из устойчивого состояния. Система устойчива не только «в большом», но и «в малом», что является безусловным её преимуществом среди всех нелинейных систем, имеющих хотя бы небольшую неустойчивость «в малом», то есть хотя бы небольшие колебания около равновесного состояния.

На Рис. 22 показан процесс при подаче на вход весьма значительного гауссова шума, который также показан на этом же графике в виде фонового сигнала. Видно, что система существенно подавляет и фильтрует этот шум в противоположность системе, процессы в которой показаны на Рис. 14, которая даже очень малые шумы преобразует в колебания достаточно значительной амплитуды. Для сравнения: система с процессом по Рис. 14 шумы амплитудой 0,02 единицы превращает в колебания амплитудой 0,6 единиц, т.е. увеличивает её в 30 раз. А полученная в итоге система с процессом, показанным на Рис. 22, шумы с амплитудой до 3 единиц фильтрует до остаточного значения 0,25 единиц, т.е. подавляет шум в 12 раз.

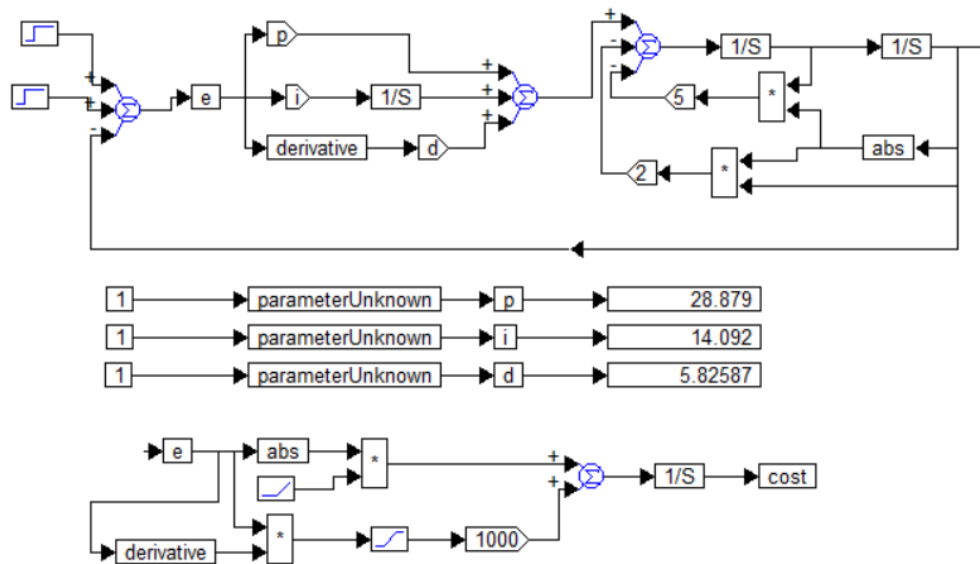


Рис. 17. Структура для оптимизации регулятора при подаче двух последовательностей ступенчатых входных сигналов, в результате которой окончательное значение вновь становится нулевым; результат оптимизации показан в мониторах справа в центре рисунка.

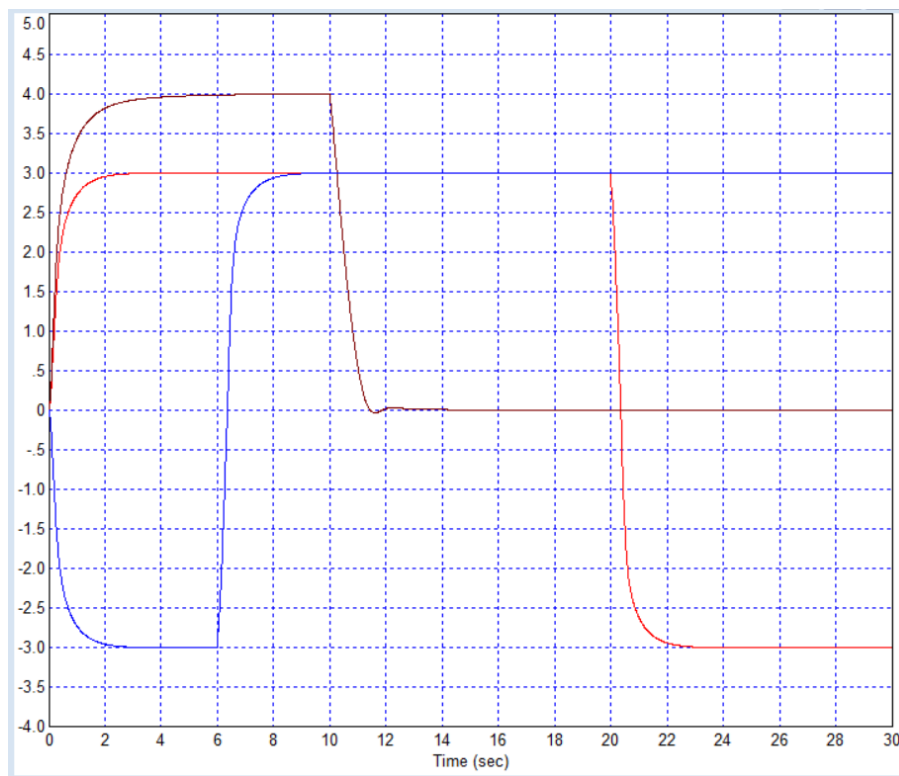


Рис. 18. Отклик системы на различные сигналы, включая тестовый, используемый при оптимизации

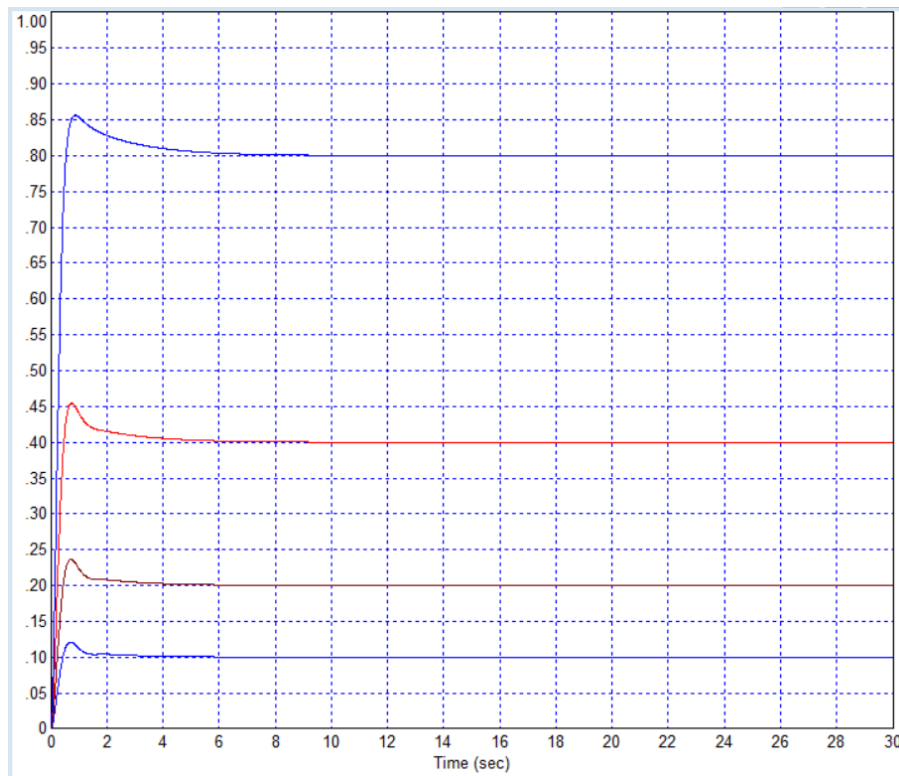


Рис. 19. Отклик системы на ступенчатые входные сигналы различной амплитуды от 0,1 до 0,8

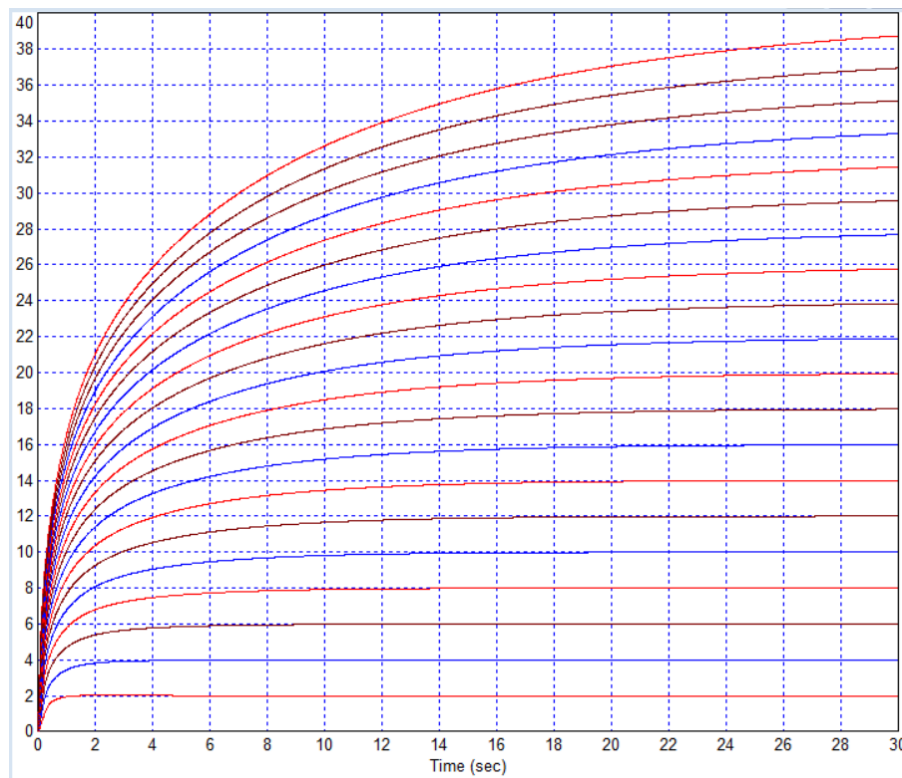


Рис. 20. Отклик системы на ступенчатые входные сигналы различной амплитуды от 2 до 40: управление во всех случаях успешное



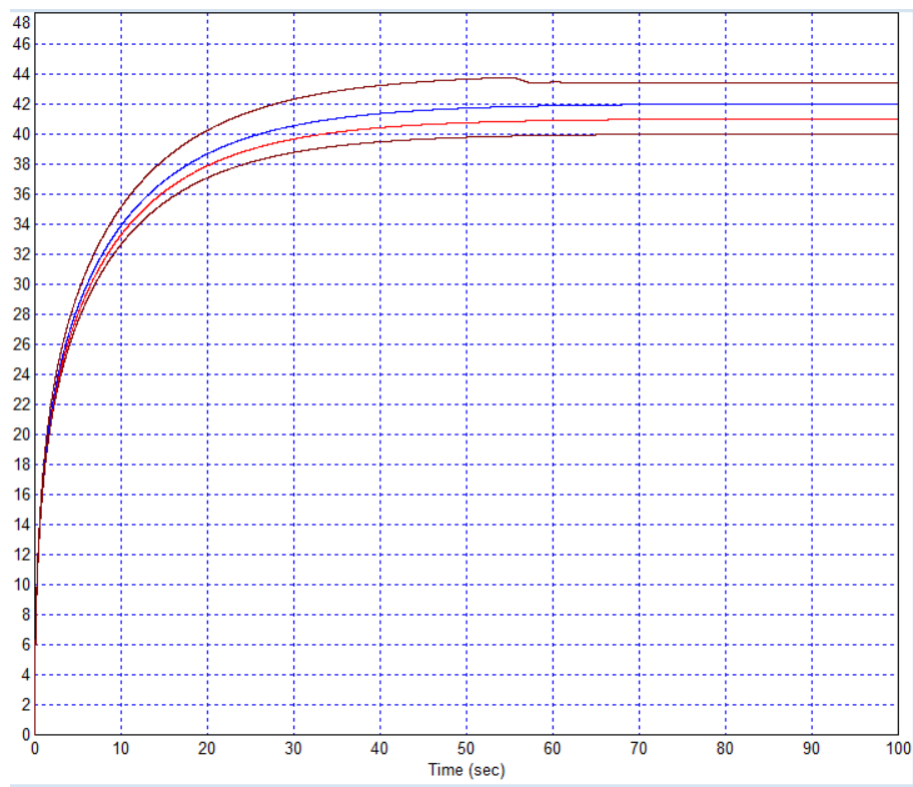


Рис. 21. Отклик системы на ступенчатые входные сигналы различной амплитуды от 40 до 43: управление успешное при амплитуде до 42 единиц включительно, при амплитуде 43 единицы в отклике присутствуют проблемы, установившееся значение не равно предписанному значению

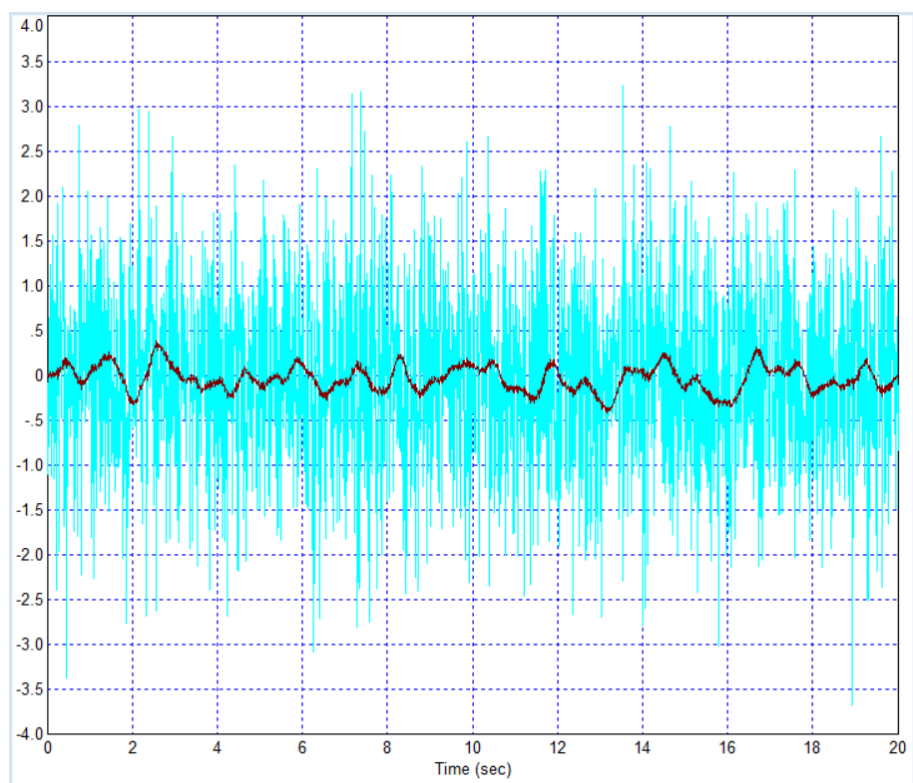


Рис. 22. Переходный процесс в системе по структуре (2) при подаче на вход гауссова шума (шумовой сигнал показан на этом же графике)

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По проделанным модельным исследованиям можно сделать следующие предварительные выводы.

Безусловно, управление нелинейными объектами является намного более сложной задачей, чем управление линейными объектами, и безусловно, получение откликов на тестовые сигналы только какой-то одной фиксированной амплитуды являются абсолютно недостаточной демонстрацией решения поставленной задачи. Как и следовало ожидать, необходимо предоставлять семейство откликов системы на набор различных сигналов.

Можно рекомендовать для верификации полученного решения для нелинейного объекта получать семейство откликов системы на тестовые входные сигналы различной амплитуды. Амплитуды этих тестовых сигналов следует выбирать из того диапазона, который ожидается в реальной системе с реальным объектом.

Обязательна при решении задачи управления нелинейным объектом проверка того предположения, что знак сигнала не изменяет вид отклика системы кардинально. Если математическая модель системы симметрична относительно знака входного сигнала, такую проверку, по-видимому, можно не делать, поскольку это предположение можно в достаточной степени обосновать теоретически, однако, хотя бы один-два тестовые проверки все-таки желательны.

Если полученная система с нелинейным объектом неустойчива при малых сигналах, необходима проверка отклика системы не только на малые входные сигналы и не только на малые шумы, но также и на сигнал, имеющий такую форму, которая возвращается в нулевое значение или в малое значение входного сигнала. В этом случае может оказаться, что отклик на такой сигнал является недопустимым, например, формируется устойчивое колебание излишне большой амплитуды.

Впервые обосновано и предложено для оптимизации нелинейных систем управления объектом, имеющим существенную склонность к колебаниям, например, вследствие множественных нелинейных обратных связей, предложено использование в качестве тестового сигнала такого ступенчатого сигнала, который не только содержит скачок из нулевого значения в ненулевое, но также обязательно содержит обратный скачок из ненулевого значения в нулевое. Данная модификация доказана как существенная для оптимизации нелинейных объектов, поскольку такая модификация обеспечивает устойчивость полученной системы в малом, т.е. при нулевых сигналах, получившихся по окончании переходного процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Жмудь. Тестирование регуляторов по методу локализации на их эффективность. Автоматика и программная инженерия. 2022. 2 (40). С. 55–69.
- [2] 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.
- [3] Жмудь В. А. Системы автоматического управления высшей точности: учеб. пособие / В. А. Жмудь, А. В. Тайченачев. – Новосибирск.: Изд-во НГУ, 2016. 133 с. ISBN 978-5-4437-0603-0.
- [4] Автоматизированное проектирование систем управления.: учеб. пособие / Новосибирск, 2012: учеб.-метод. пособие / В. А. Жмудь.: НГТУ, 2012. - 72 с.
- [5] Жмудь В. А. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim.: учеб. пособие / Новосибир. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2012.: учеб. пособие / В. А. Жмудь.: НГТУ, 2012. - 124 с.
- [6] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. - 126 p
- [7] 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.



**Асхат Асет** - Докторант Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева по специальности: 8D07103 Автоматизация и управление; Должность: старший преподаватель Казахский национальный университет им. аль-Фараби; Телефон: 8707 234 89 66; E-mail: [aset.asxat@mail.ru](mailto:aset.asxat@mail.ru)



**Мадина Эсимхановна Мансурова** Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, 050040, Казахстан, доцент, кандидат физико-математических наук, доцент E-mail: [mansurova01@mail.ru](mailto:mansurova01@mail.ru)



**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: [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@bk.ru)

Статья получена 18.07.2022

## Control of a Non-Linear Plant with Many Non-Linear Feedbacks

A. Aset<sup>1</sup>, M.E. Mansurova<sup>2</sup>, V.A. Zhmud<sup>3, 4, 5</sup>

<sup>1</sup>Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeeva, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Novosibirsk Institute of Program Systems, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>5</sup>Altai-Sayan Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*Abstract.* The control of non-linear objects is becoming increasingly important. The numerical optimization method is the most effective for these purposes. Checking the result by the response of the resulting system to a single step action, often practiced when designing control systems for linear objects, is often applied to control systems for non-linear objects, which is a mistake. This article demonstrates that even in the case of successful control demonstrated with such a test signal, the system may have insufficient quality when processing signals of a different amplitude. Therefore, it is necessary to check the stability of the system and the quality of the transient process, including accuracy, overshoot, and the absence of fluctuations in a much wider range of reference signals. It is shown that the optimization result significantly depends on the type and amplitude of the signals used as a test task during the optimization procedure. It was found that the system may be unstable in small things, i.e. for small nonzero signals, the system may be prone to oscillations. It is also shown that a system that demonstrates itself as sufficiently high-quality by many test signals can exhibit unacceptably poor quality, including large-amplitude self-oscillations as a response to a signal that first jumps from zero to non-zero, and then jumps back to zero. condition. For the first time, it was proposed to use just such the most complex signal for some types of nonlinear systems as a test signal for the duration of the numerical optimization procedure. It is shown that in this case the best possible setting of the PID controller is obtained, such a system significantly suppresses even noise with an average of zero, while a system optimized by a step jump, under such conditions, goes into a state of self-oscillations with a significant amplitude.

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

### REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud. Testing of Effectiveness of the Regulators by the Method of Localization. *Automatics & Software Engineering*. 2022, N 2 (40). P.55–69.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Avtomatizirovannoye proyektirovaniye sistem upravleniya.: ucheb. posobiye / Novosibirsk, 2012: ucheb. - metod. posobiye / V. A. Zhmud': NGTU, 2012. – 72 s.
- [5] 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.
- [6] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. – 126 p
- [7] 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.



**Askhat Aset** – PhD-student of Almaty University of Energy and Communications. G. Daukeeva, specialty: 8D07103 Automation and control; Position: Senior Lecturer Kazakh National University. al-Farabi; Phone: 8707 234 89 66; E-mail: [aset.asxat@mail.ru](mailto:aset.asxat@mail.ru)



**Madina Esimkhanovna Mansurova** Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Kazakhstan, associate professor, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

E-mail: [mansurova01@mail.ru](mailto:mansurova01@mail.ru)



**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](mailto:oao_nips@bk.ru)

The paper has been received on 18/07/2022.