

Исследование запаса устойчивости системы управления нелинейным объектом со многими нелинейными обратными связями при изменении параметров его модели

А. Асет

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

Аннотация. В статье [1] описан метод и результат проектирования регулятора для нелинейного объекта. Предложен ПИД-регулятор, предложены тестовые сигналы, нехарактерные для аналогичной задачи синтеза регулятора для линейного объекта, также предложено конкретное численное решение. В заключительной части статьи осуществлено моделирование, подтверждающее успешность решения поставленной задачи. Однако, в этой статье не осуществлена детальная проверка того, насколько данное решение поставленной задачи устойчиво в случае изменения коэффициентов нелинейной модели объекта. Проверка этого может быть осуществлена дополнительным моделированием. Ситуация осложняется тем, что, во-первых, переходные процессы зависят от амплитуды и формы входного сигнала, во-вторых, коэффициентов в модели объекта несколько. В частности, имеется два коэффициента, определяющих глубину нелинейной обратной связи. Статья предлагает метод этой проверки и её результаты.

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

ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] решена задача проектирования регулятора для объекта, нелинейная модель которого задана следующим уравнением

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

В этом уравнении 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, $a_1 = 5$, $a_2 = 3$.

В статье предложен последовательный ПИД-регулятор, передаточная функция которого 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.

Получены следующие коэффициенты регулятора:

$$k_p = 28,879, k_i = 14,09, k_d = 5,826. \quad (3)$$

Для верификации данного решения осуществлено моделирование с несколькими значениями входного сигнала задания.

Однако, в статье не уделено внимания проблемам того, насколько точно известны коэффициенты модели (2), или насколько они

стабильны. В предположении, что эти коэффициенты могут изменяться, желательно понять, будет ли такая система оставаться устойчивой, будет ли сохраняться в ней точность, насколько изменится диапазон допустимых входных сигналов, в котором система будет сохранять приемлемое качество.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для объекта (1) с регулятором (2) при значениях коэффициентов согласно (3) необходимо исследовать, в какой мере можно доверять этому полученному решению при условии, что коэффициенты (3) могут кратно изменять свои значения. Например, интересно увеличение и уменьшение значений этих коэффициентов в 2 раза, также представляет определенный интерес увеличение и уменьшение этих коэффициентов в 4 раза.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения задачи будем использовать метод математического моделирования. Предлагается использовать программу *VisSim* со всеми предложенными техническими приемами из публикаций [2–7].

На *Рис. 1* показана структурная схема для оптимизации и моделирования данной системы. В статье [1] рекомендуется формирование тестового сигнала из более чем одного генератора ступенчатого воздействия, но поскольку в данной статье используется уже рассчитанный набор коэффициентов, можно упростить моделирование и использовать для проверки только один генератор ступенчатого входного сигнала. При необходимости эти исследования можно повторить и с более

сложным генератором тестового входного сигнала.

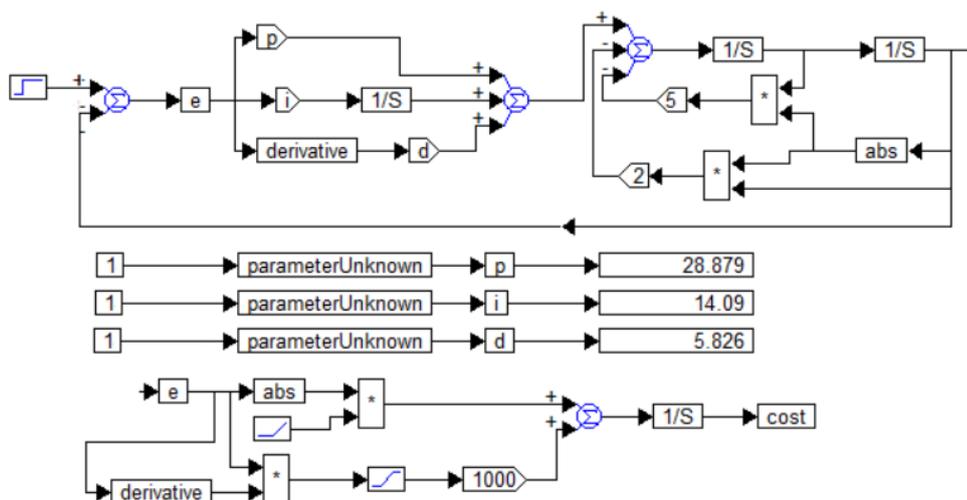


Рис. 1. Структурная схема для моделирования системы по уравнениям (1), (2) с численными значениями регулятора (3) при условии

Мы не можем перебором испытать все возможные варианты изменений параметров модели объекта, чтобы проследить все возможные изменения свойств замкнутой системы. Поэтому приходится на каких-то вариантах останавливаться. Предлагается предварительно изменять только один из двух параметров, чтобы исследовать, остается ли система устойчивой, сохраняет ли она свои важнейшие свойства: точность, отсутствие колебаний, быстродействие. Далее предлагается одновременное изменение обоих коэффициентов. Для того, чтобы на графиках результат был достаточно наглядным, предлагается в этом случае сначала проверить изменение свойств при одинаковом кратном увеличении и уменьшении каждого из двух коэффициентов, после этого предлагается исследование изменений свойств при изменениях коэффициентов в противоположных направлениях, то есть при увеличении одного коэффициента и кратном уменьшении другого коэффициента, и наоборот.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На Рис. 2 показаны переходные процессы при амплитуде входного сигнала 10 единиц и при изменении коэффициента a_1 . Этот коэффициент имеет номинальное значение, равное 2, поэтому использовано увеличение и уменьшение этого коэффициента в 2 и в 4 раза. Таким образом, этот коэффициент принимает значения 0,5; 1; 2; 4 и 8. Видно, что при увеличении этого коэффициента длительность переходного процесса существенно возрастает. При уменьшении этого коэффициента быстродействие возрастает, причем при значении $a_1 = 1$ переходный процесс даже характеризуется более лучшими параметрами, чем при номинальном значении, а при значении $a_1 = 0,5$ в переходном процессе хотя и

появляется перерегулирование, оно составляет только 15%, так что это процесс можно вполне считать приемлемым.

На Рис. 3 показаны переходные процессы при амплитуде входного сигнала 2 единицы и при изменении коэффициента a_1 . Тенденция приблизительно такая же, однако, наилучший процесс все же имеет место при номинальном значении этого параметра, при значении $a_1 = 0,5$ перерегулирование в переходном процессе достигает 25%.

На Рис. 4 показаны переходные процессы при амплитуде входного сигнала 0,5 единицы и при изменении коэффициента a_1 . Переходные процессы уже изначально имеют перерегулирование. При номинальном значении $a_1 = 2$ перерегулирование составляет около 11%, при уменьшении этого коэффициента в 2 и в 4 раза перерегулирование несущественно возрастает, достигая, соответственно, 12% и 13%. При увеличении этого коэффициента перерегулирование снижается до 4%.

Далее исследуем влияние второго коэффициента, для этой цели вернем первый коэффициент к номинальному значению.

На Рис. 5 показаны переходные процессы при амплитуде входного сигнала 0,5 единицы и при изменении коэффициента a_2 . Как уже сказано выше, при этом входном сигнале переходные процессы уже изначально имеют перерегулирование. При номинальном значении $a_2 = 5$ перерегулирование составляет около 11%, при уменьшении этого коэффициента в 2 и в 4 раза перерегулирование несущественно возрастает, достигая, соответственно, 12% и 13%. При увеличении этого коэффициента перерегулирование снижается до 4%.

На Рис. 6 показаны переходные процессы при амплитуде входного сигнала 5 единиц и при

изменении коэффициента a_2 . Уменьшение этого коэффициента увеличивает быстродействие системы, а увеличение этого коэффициента

уменьшает быстродействие и увеличивает перерегуливание.

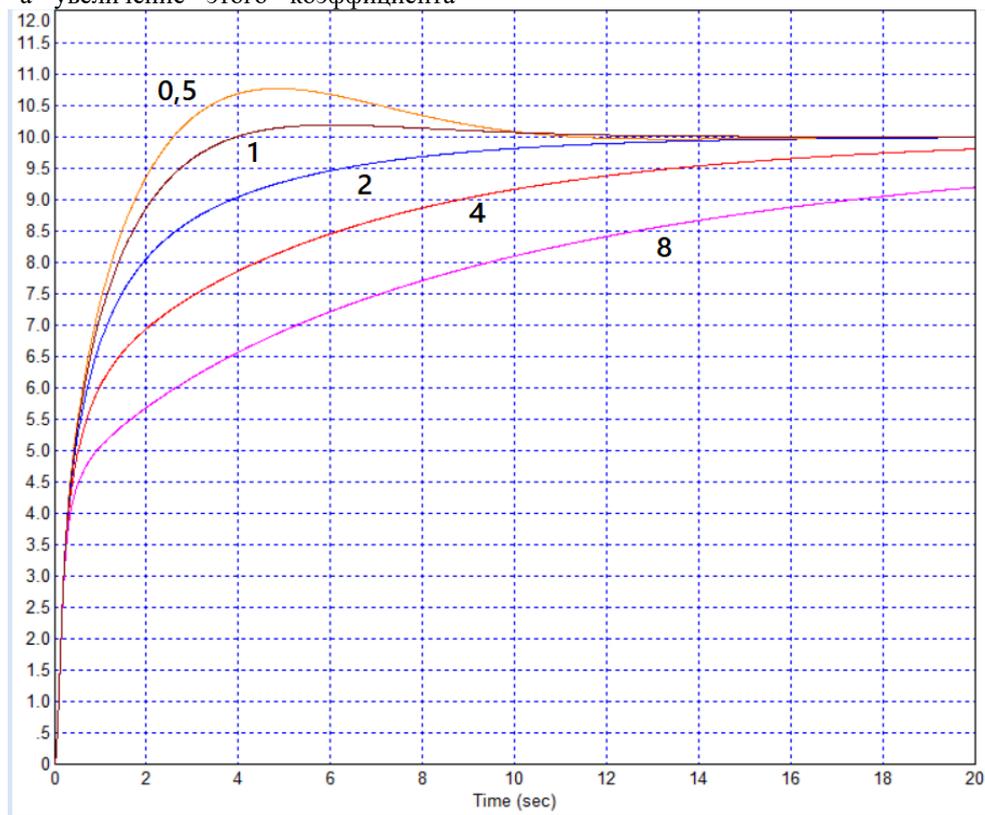


Рис. 2. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала 10 единиц и при изменении коэффициента a_1 : значения коэффициентов написаны рядом с графиками

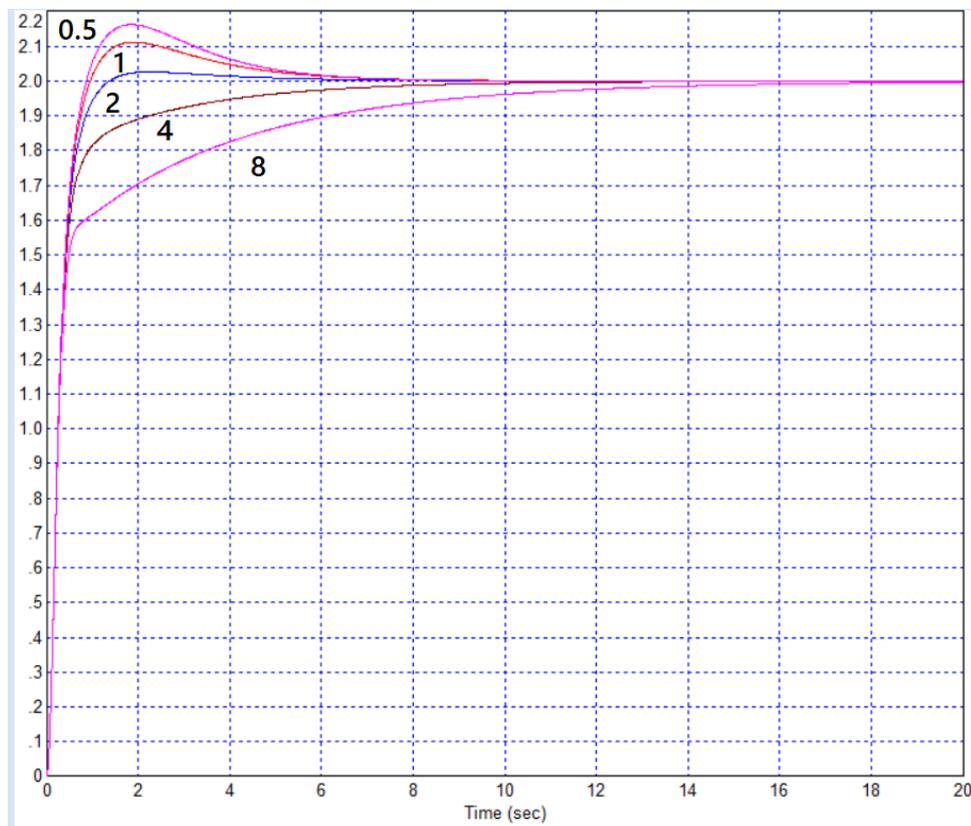


Рис. 3. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала 2 единицы и при изменении коэффициента a_1 : значения коэффициентов написаны рядом с графиками

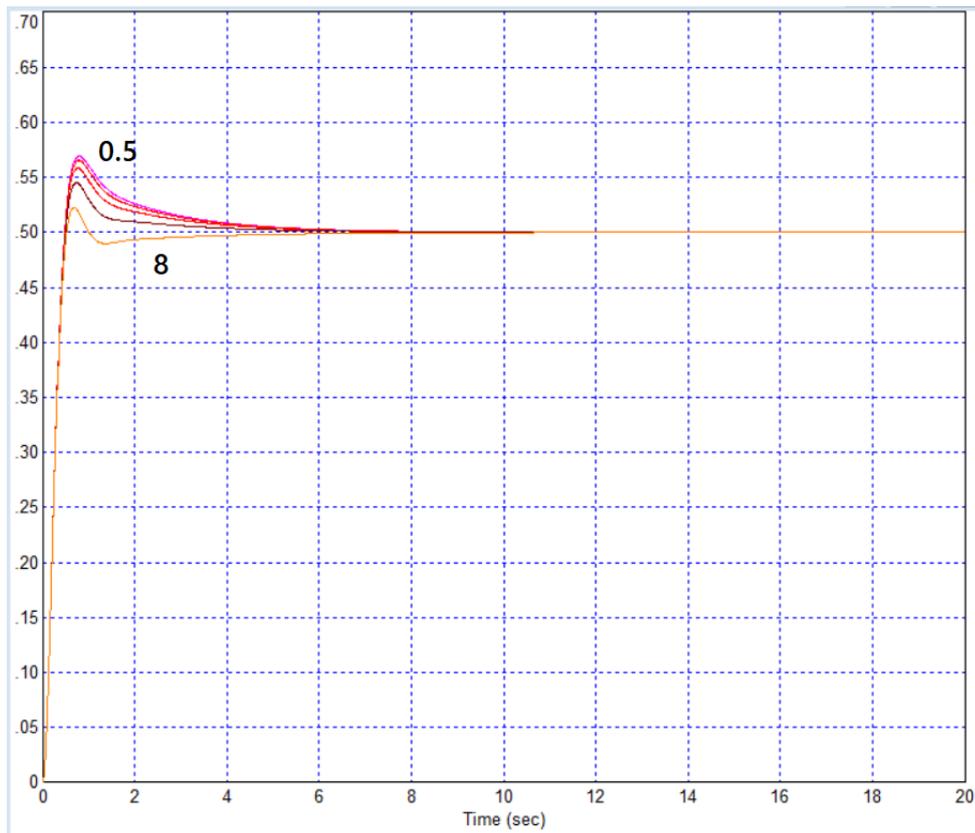


Рис. 4. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала 0,5 единицы и при изменении коэффициента a_2 : значения коэффициентов написаны рядом с графиками

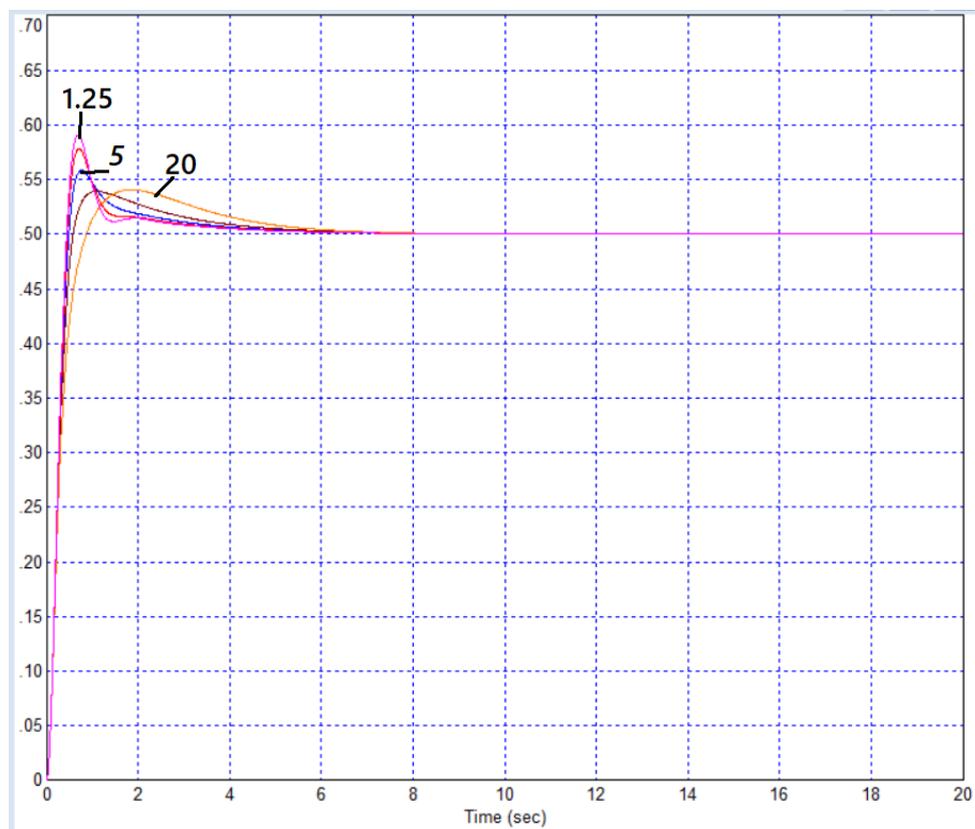


Рис. 5. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала 2 единицы и при изменении коэффициента a_2 : **основные** значения коэффициентов написаны рядом с графиками

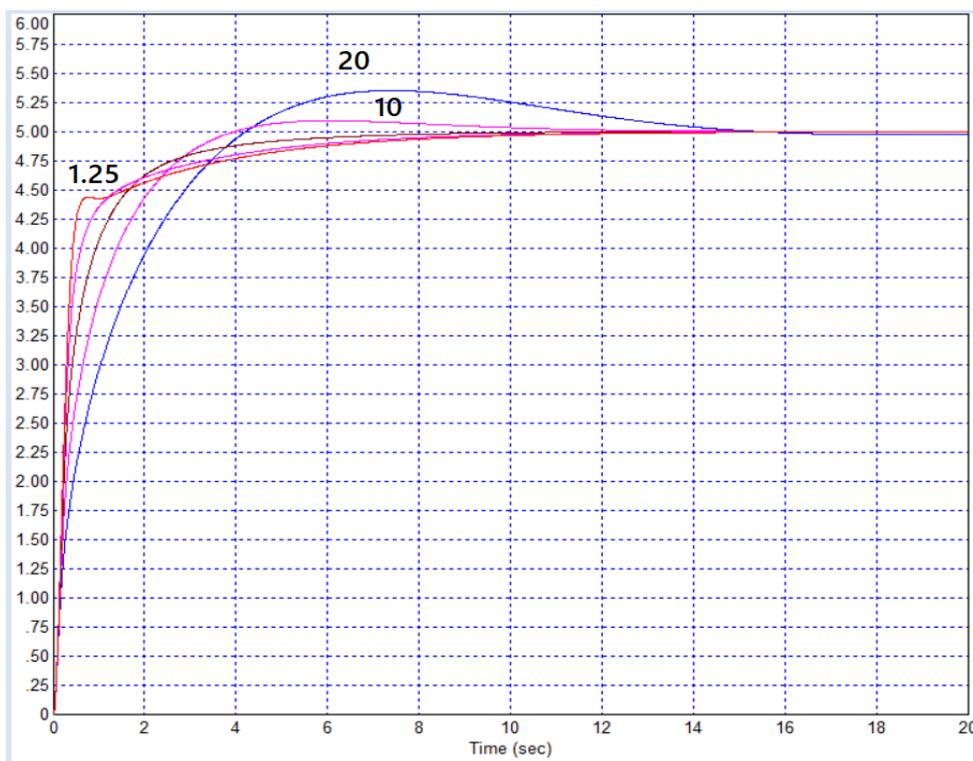


Рис. 6. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала 5 единиц и при изменении коэффициента a_2 : **основные** значения коэффициентов написаны рядом с графиками

На Рис. 7 показаны переходные процессы при амплитуде входного сигнала 20 единиц и при изменении коэффициента a_2 . Уменьшение этого коэффициента несущественно влияет на переходный процесс, можно отметить, что это лишь слегка увеличивает быстродействие системы. Увеличение этого коэффициента в этих условиях вдвое несколько уменьшает быстродействие, но увеличение этого коэффициента вчетверо влияет на поведение системы катастрофически: система после достижения значения примерно в 12 единиц далее уменьшает выходной сигнал сначала до квазистационарного уровня чуть менее 11 единиц, но постепенно это значение медленно уменьшается, после чего процесс срывается в область отрицательных бесконечно возрастающих по величине значений, то есть система теряет устойчивость. Можно отметить, таким образом, что при входном сигнале в 20 единиц значение второго коэффициента на уровне $a_2 = 20$ фатально.

Это заставляет предположить, что крайнее значение для параметра a_1 также может привести к потере системе устойчивости при задании, равном 20 единиц. Поэтому мы осуществим дополнительные испытания, результаты которых показаны на Рис. 8. Таким образом, на Рис. 9 показаны переходные процессы при входном сигнале, равном 20 единиц при изменении коэффициента a_1 . Как видим, система остается устойчивой при всех значениях этого параметра

в пределах предыдущего диапазона для этой величины. С ростом этого коэффициента быстродействие системы падает достаточно существенно.

На Рис. 10 показаны переходные процессы в системе при входном значении сигнала, равном 5 единиц. Наряду с процессом, характерным для номинальных значений параметров объекта, приведены процессы, в которых оба коэффициента изменены вчетверо. Если оба коэффициента уменьшены вчетверо, переходный процесс становится более быстрым, но возникает небольшое перерегулирование, равное приблизительно 3.5%. Если оба коэффициента увеличены вчетверо, быстродействие системы заметно снижается, перерегулирования не возникает. На Рис. 11 показаны переходные процессы, когда параметры изменяются в противоположном направлении. Если параметр a_1 вчетверо уменьшается, тогда как параметр a_2 вчетверо увеличивается, перерегулирование в системе существенно увеличивается, достигая почти 20%, и быстродействие при этом уменьшается, то есть процесс ухудшается по всем параметрам. Если же a_1 вчетверо увеличивается, тогда как параметр a_2 вчетверо уменьшается, тогда перерегулирования не возникает, но процесс также очень сильно увеличивает свою длительность, кроме того, в ходе развития процесса имеется некоторый небольшой участок

с обратным ходом процесса, но эта особенность формально не считается слишком существенной.

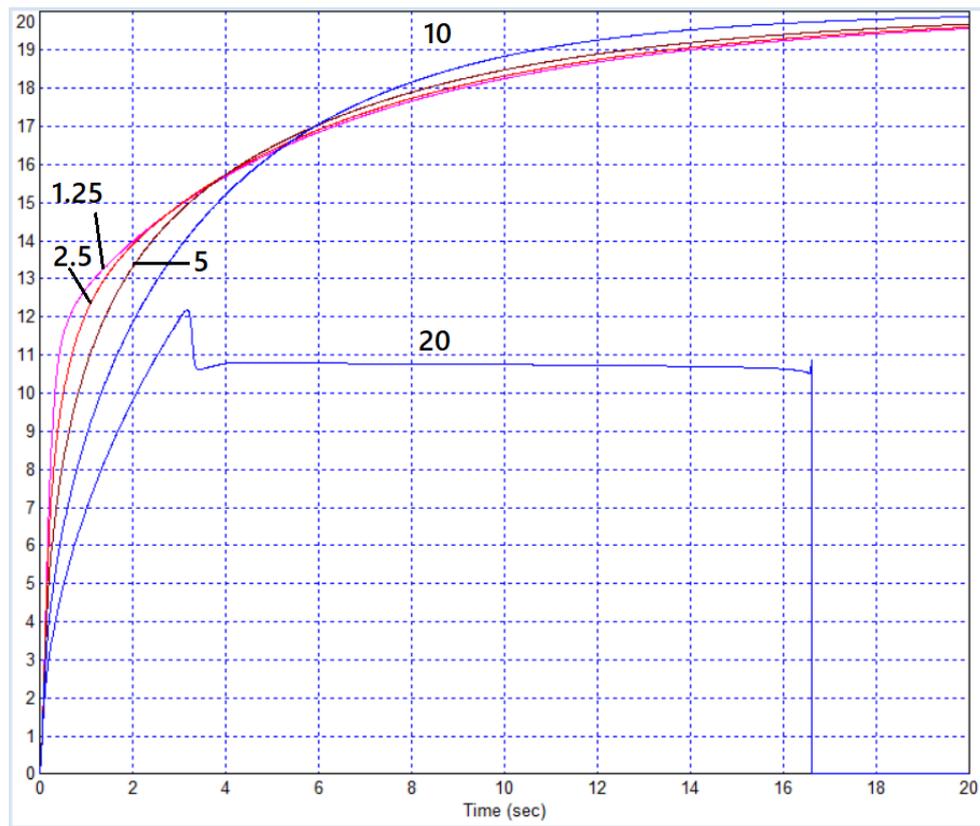


Рис. 7. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала 20 единиц и при изменении коэффициента a_2 : значения коэффициентов написаны рядом с графиками

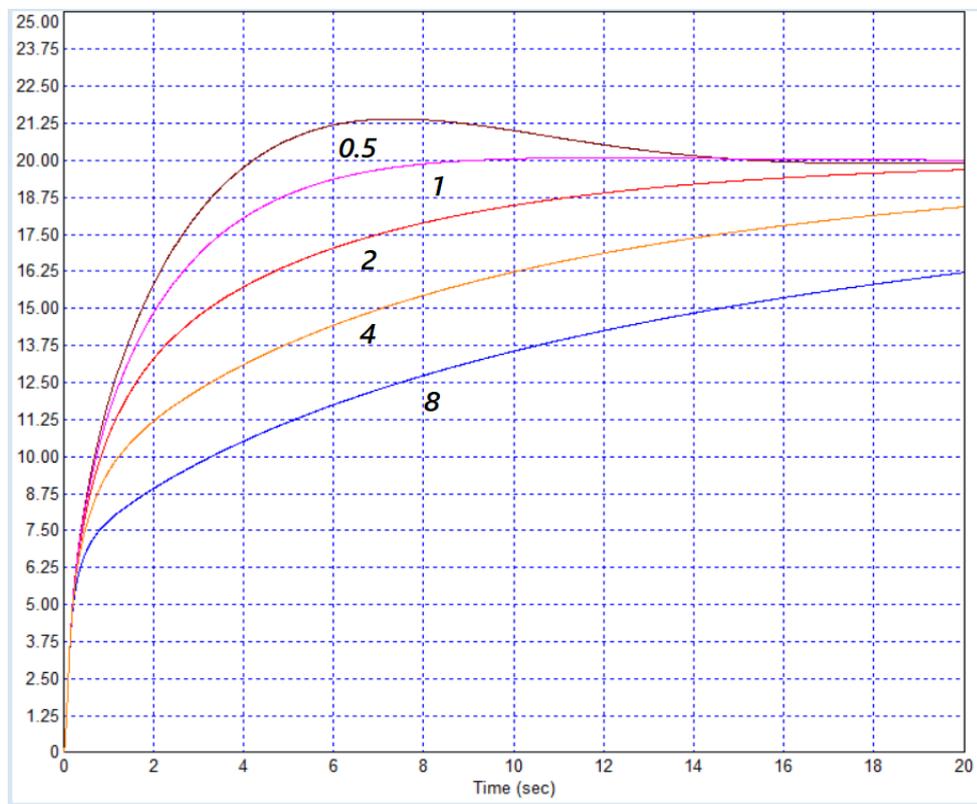


Рис. 7. Переходные процессы при амплитуде входного сигнала 20 единиц и при изменении коэффициента a_1 : значения коэффициентов написаны рядом с графиками

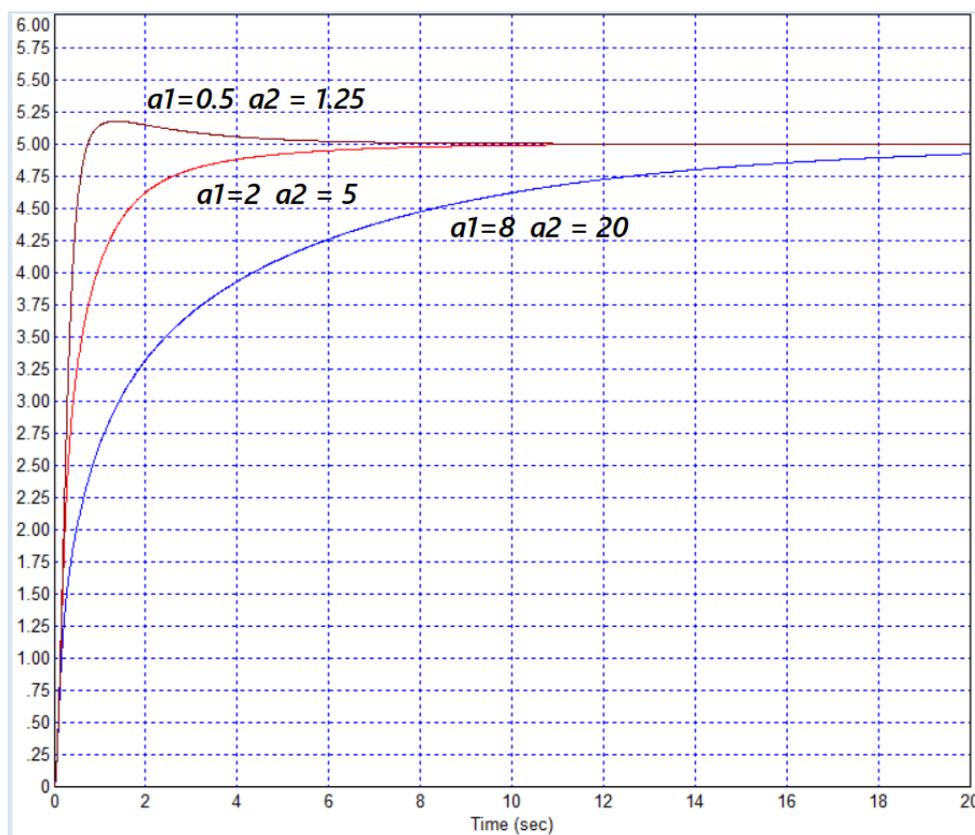


Рис. 8. Переходные процессы, когда параметры изменяются в одинаковом направлении

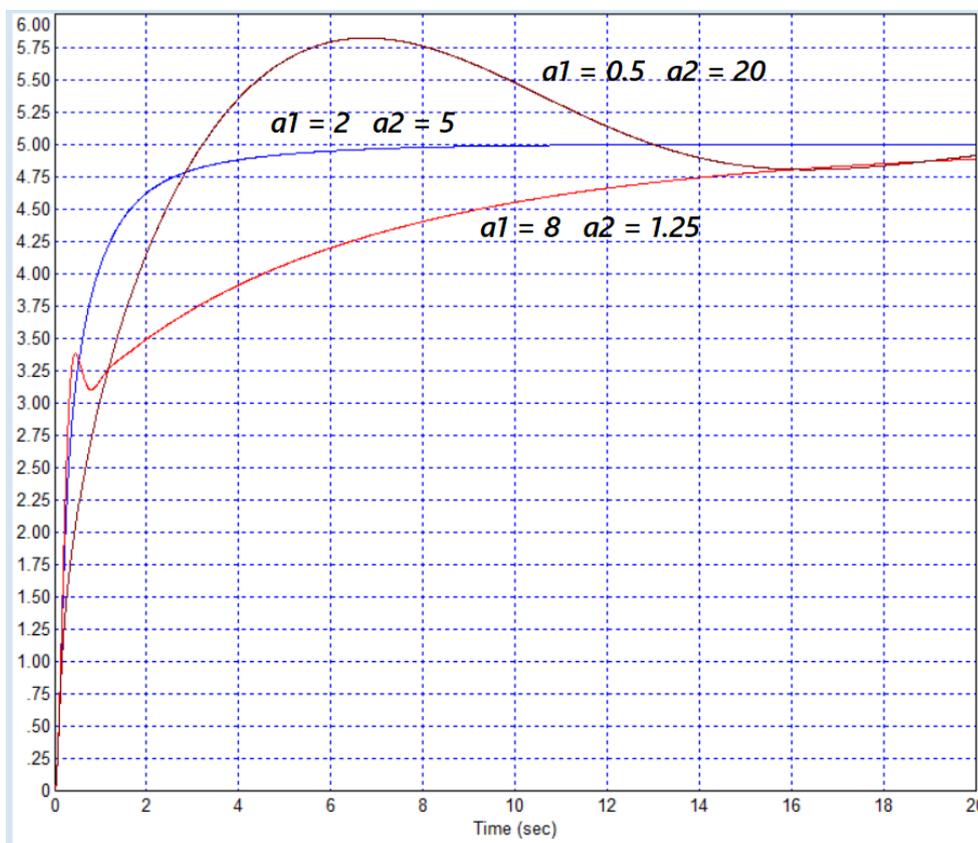


Рис. 9. Переходные процессы, когда параметры изменяются в противоположном направлении

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Точки, в которых осуществлены испытания, показаны на *Рис. 10*. При этом в большинстве точек испытания осуществлены при трех значениях входных сигналов или более. Если эти точки представить в логарифмическом масштабе, точки лягут более равномерно.

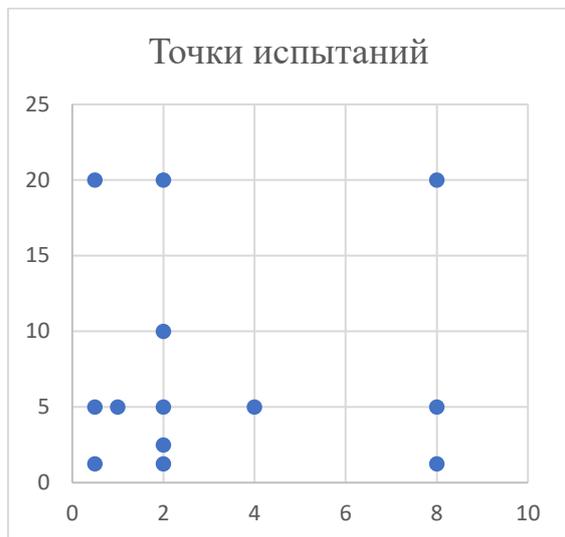


Рис. 10. Точки испытаний: по оси абсцисс параметр a_1 , по оси ординат параметр a_2

Можно утверждать на основании выполненных исследований, что если изменения параметров модели в 2 и даже в 4 раза изменяются, то в пределах средних значений входных сигналов система остаётся устойчивой, хотя качество её в большинстве случаев ухудшается. Безусловно, эта система обладает достаточной грубостью, что является важнейшим свойством такой системы. В небольшом диапазоне этих изменений можно даже считать систему робастной, то есть она будет выполнять свои функции, например, если параметры изменяются в 1,5 – 2 раза.

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. 71–87.
- [2] 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.
- [3] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. - 126 p
- [4] 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.
- [5] 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>
- [6] 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.
- [7] 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>



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

Статья получена 22.07.2022

Investigation of the Stability Margin of a Control System for a Nonlinear Plant with Many Nonlinear Feedbacks when the Parameters of its Model Change

A. Aset

Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeeva, Almaty, Kazakhstan

Abstract. The paper [1] describes the method and result of designing a controller for a nonlinear plant. A PID controller is proposed, test signals are proposed that are not typical for a similar problem of controller synthesis for a linear plant, and a specific numerical solution is also proposed. In the final part of the article, modeling was carried out, confirming the success

of solving the problem. However, this article did not carry out a detailed check of how this solution of the problem is stable in the event of a change in the coefficients of the nonlinear model of the object. This can be verified by additional simulations. The situation is complicated by the fact that, firstly, transient processes depend on the amplitude and shape of the input signal, and secondly, there are several coefficients in the object model. In particular, there are two coefficients that determine the depth of non-linear feedback. The article proposes a method for this verification and its results.

Key words: verification, testing, robustness, roughness, automation, PID controller, control, nonlinear plant, numerical optimization, modeling, 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] 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.
- [3] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. – 126 p
- [4] 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.
- [5] Vostrikov A.S., Voyevoda A.A., Zhmud' V.A. Effekt ponizheniya poryadka 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>
- [6] 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.
- [7] 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>



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

The paper has been received on 22/07/2022.