

В. А. Жмудь, д-р техн. наук, зав. каф., oao_nips@bk.ru,
А. С. Востриков, д-р техн. наук, проф., a.s.vostrikov@gmail.com,
А. Ю. Ивойлов, аспирант, iau13hv@mail.ru,

Г. В. Саблина, канд. техн. наук, доц., sablina@corp.nstu.ru,
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Синтез робастных ПИД регуляторов методом двойной оптимизации

Проектирование адаптивных регуляторов позволяет решать задачу управления объектом с нестационарными параметрами. Однако если параметры объекта изменяются не слишком сильно или если известен лишь некоторый интервал их изменения, может оказаться, что адаптивный регулятор не требуется, поскольку задача может быть решена с помощью робастного регулятора. Робастный регулятор позволяет обеспечить приемлемое качество управления даже в том случае, если параметры математической модели объекта изменяются в некотором наперед заданном интервале. Известен способ проектирования таких регуляторов методом численной оптимизации ансамбля регуляторов, используемых в ансамбле систем, в которых модели объектов различны, а модели регуляторов идентичны. При этом в ансамбле используются модели объектов с крайними значениями параметров. Недостаток этого метода состоит в слишком большом числе систем, которые требуется одновременно моделировать и оптимизировать, если изменяемых параметров несколько. Кроме того, наихудшее сочетание параметров модели может быть не граничным, а серединным, в этом случае данный метод не применим. В данной статье авторы предлагают и анализируют на численном примере альтернативный метод проектирования робастного регулятора. Суть данного метода заключается в численной оптимизации регулятора для модели с наихудшим сочетанием значений всех изменяемых параметров. Поиск наихудшего сочетания параметров осуществляется также с помощью метода численной оптимизации. При этом отыскивается такое сочетание параметров модели, при котором наилучшее соотношение коэффициентов регулятора дает наихудший результат работы системы. Задача решается в несколько циклов оптимизации с чередованием целевых функций. Целевая функция представляет собой некоторую интегральную оценку ошибки управления в системе, ее вид определяется решаемой задачей. Полезность предложенного метода проиллюстрирована численно на примере динамического объекта третьего порядка с последовательно включенным звеном запаздывания.

Ключевые слова: численная оптимизация, регулирование, робастная система, симуляция, моделирование, математическая модель, объект, ПИД регулятор

Введение

Актуальность задачи проектирования робастных регуляторов подтверждается большим числом публикаций на эту тему [1–37]. Такие регуляторы позволяют управлять объектами даже в том случае, когда параметры их математических моделей не известны точно или изменяются в некоторых пределах, но при условии, что границы изменения каждого из параметров известны. Задача отыскания робастного регулятора для каждого конкретного случая может оказаться невыполнимой, и в этом случае необходимо использовать адаптивный регулятор. Если же робастный регулятор существует, необходима методика его расчета, т. е. расчета всех коэффициентов этого регулятора.

Задача отыскания структуры регулятора в данной статье не рассматривается, поскольку ПИД регуляторы являются наиболее универ-

сальными структурами, адекватными поставленной задаче в большинстве случаев. Наличие оснований для предпочтения других структур регулятора не меняет сути предлагаемой и исследуемой методики расчета его коэффициентов.

Наиболее эффективный подход к отысканию коэффициентов регулятора для интервально заданных моделей объекта базируется на численной оптимизации [37]. Для того чтобы принять в расчет все известные сочетания параметров модели объектов, могут использоваться несколько подходов.

Первый подход состоит в том, что при оптимизации одновременно используются несколько моделей объекта с различными фактическими значениями параметров его модели [37].

При этом моделируется столько моделей системы, сколько используется различных сочетаний параметров, но в каждой системе модель регулятора всегда одна и та же, а коэффици-

енты этой модели отыскиваются методом численной оптимизации.

Целевая функция представляет собой интегральную оценку всех модулей ошибки во всех моделируемых системах, также целевая функция может иметь дополнительные члены для улучшения процедуры поиска.

Таким образом, моделируется ансамбль систем с идентичными регуляторами в целях отыскания регулятора, дающего минимум суммы всех частных целевых функций, характеризующих качество каждой моделируемой системы. Структурная схема проекта для этого метода решения показана на рис. 1.

Недостатком этого подхода является излишняя сложность проекта для моделирования: при двух параметрах требуется одновременное использование не менее чем четырех моделей, при трех параметрах требуется восемь моделей, при N изменяемых параметрах модели требуется 2^N моделей. Но и в этом случае число моделей недостаточно для полной уверенности в правильности результата, поскольку при этом проверяются только граничные точки интервалов изменения всех параметров, тогда как может оказаться, что наихудшим сочетанием параметров объекта является некоторое сочетание, не являющееся граничным.

Второй подход состоит в том, что параметры модели объекта медленно изменяются в соответствии с некоторой периодической зависимостью. Это обеспечивает постепенное изменение параметров во всем диапазоне допустимых значений, поэтому численная оп-

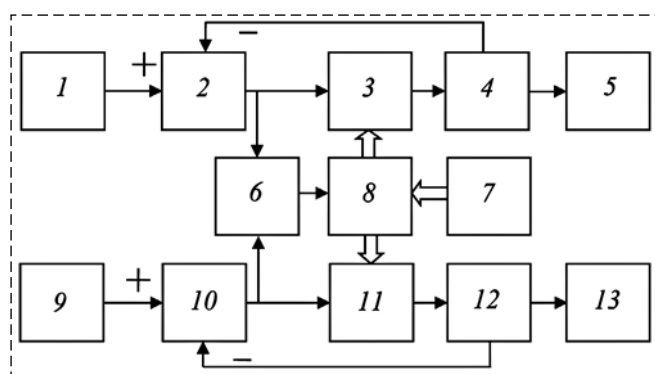


Рис. 1. Проект для оптимизации регулятора:

1, 9 — формирователь задания; 2, 10 — вычитающий элемент; 3, 11 — идентичные перестраиваемые модели регулятора; 4, 12 — различные модели объекта; 5, 13 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор

Fig. 1. The project for regulator optimization:

1, 9 — the setpoint former; 2, 10 — the subtraction element; 3, 11 — the identical tunable models of regulator; 4, 12 — the different models of the object; 5, 13 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer

тимизация должна теоретически давать такой результат настройки регуляторов, при котором система будет оставаться устойчивой при всех параметрах ее модели, которые были использованы в ходе моделирования. Структурная схема проекта для этого метода решения показана на рис. 2.

Недостатком такой системы является требование длительного времени моделирования для того, чтобы перебором испробовать все возможные сочетания параметров объекта.

Третий подход может быть синтезирован из комбинации первых двух, а именно: может быть одновременно реализовано несколько моделей, но их недостаточное число может быть восполнено тем, что один или несколько параметров модели при этом все же медленно меняются, тогда как другие параметры зафиксированы в своих крайних значениях, что и дает некоторое сокращение времени моделирования.

Предполагается, что третий подход объединяет достоинства первых двух подходов и свободен от их недостатков. На практике же может оказаться, что третий (комплексный) подход объединяет недостатки первых двух подходов и свободен от их достоинств, поскольку при этом требуется и более сложная модель для моделирования (чем при втором подходе) и более длительное время моделирования (чем при первом подходе). В статье решается задача отыскания альтернативного метода проектирования робастного регулятора, который бы в действительности отличался от известных методов в лучшую сторону.

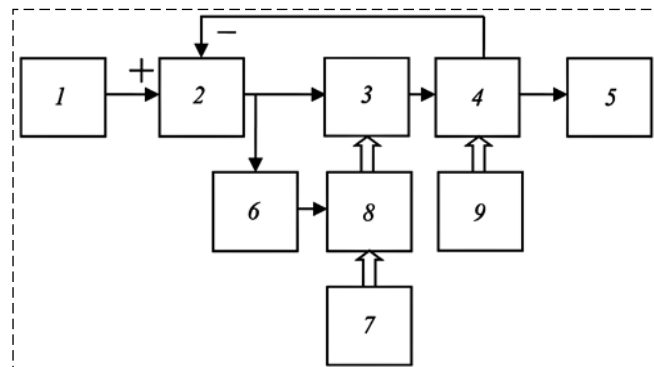


Рис. 2. Проект для оптимизации регулятора:

1 — формирователь задания; 2 — вычитающий элемент; 3 — перестраиваемая модель регулятора; 4 — перестраиваемая модель объекта; 5 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор; 9 — сканирующий генератор

Fig. 2. The project for regulator optimization:

1 — the setpoint former; 2 — the subtraction element; 3 — the tunable regulator model; 4 — the tunable object model; 5 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer; 9 — the scanning generator

Предлагаемый метод решения

Предлагается новый метод отыскания робастной настройки, основанный на численной оптимизации регулятора для наихудшей модели объекта, т. е. для наихудшего сочетания всех изменяемых параметров. Поиск наихудшей модели выполняется методом численной оптимизации, при этом отыскивается сочетание параметров модели, при котором наилучший регулятор дает наихудший результат. Задача решается в несколько циклов оптимизации с чередованием целевых функций. Методика проиллюстрирована численным примером. Прежде чем описывать предлагаемый алгоритм, дадим несколько определений.

Фиксированные параметры (ФП) — те параметры, которые в данной серии экспериментов по моделированию и оптимизации задаются фиксированными значениями. Неизвестные параметры (НП) — те параметры, которые программа моделирования отыскивает в результате серии экспериментов по моделированию в целях минимизации стоимостной функции (СФ). Результаты поиска (РП) — найденные значения для НП по окончании серии экспериментов.

Возможным алгоритмом поиска может служить, например, следующий вариант:

1. Отыскание лучшего регулятора для усредненной модели объекта. Создается модель системы из регулятора с НП и объекта с ФП. При этом ФП модели объекта берутся из середины каждого интервала их возможных изменений. Для получения РП используется метод численной оптимизации при заданной целевой функции F_1 .

2. Отыскание худшего объекта для найденного регулятора. Формируется модель системы из регулятора с ФП и объекта с НП, причем РП из пункта 1 используются как ФП регулятора. Применяется метод численной оптимизации по заданной целевой функции F_2 .

3. Отыскание лучшего регулятора для худшего объекта. Создается модель системы, состоящая из регулятора с НП и объекта с ФП, причем РП из пункта 2 используются как ФП объекта. Применяется метод численной оптимизации по заданной целевой функции F_1 . Проверяется критерий остановки поиска. Если критерий не достигнут, пункты 2 и 3 повторяются с вновь найденными НП, если он достигнут, осуществляется переход к следующему пункту.

4. Верификация результата. Проводится тестирование качества системы с найденным регулятором для всех сочетаний параметров

модели, найденных на предыдущих стадиях поиска. Если переходные процессы во всех случаях удовлетворительны, задача считается решенной. Если хотя бы один процесс неудовлетворителен, проверяется критерий окончания поиска, если он не достигнут, поиск продолжается с пункта 2, если он достигнут, поиск прекращается, задача считается не решенной.

Структурная схема проекта для решения поставленной задачи

На рис. 3 показана структурная схема проекта для первого этапа решения поставленной задачи, на рис. 4 приведена структурная схема проекта для второго этапа решения задачи.

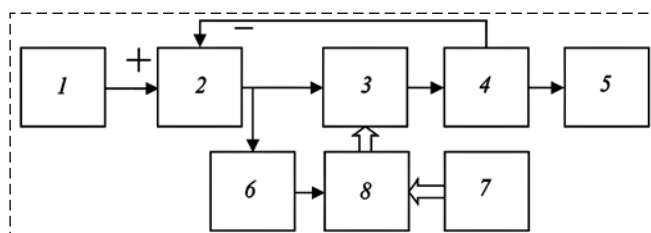


Рис. 3. Проект для реализации первого этапа оптимизации регулятора:

1 — формирователь задания; 2 — вычитающий элемент; 3 — перестраиваемая модель регулятора; 4 — модель объекта со средними значениями параметров; 5 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор в режиме поиска минимума

Fig. 3. The project for implementation of the first stage of the regulator optimization:

1 — the setpoint former; 2 — the subtraction element; 3 — the tunable regulator model; 4 — the model of the object with middle values of the parameters; 5 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer in the minimum search mode

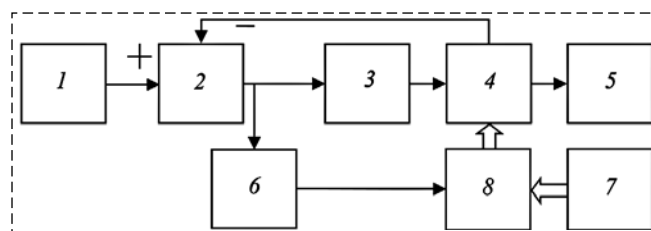


Рис. 4. Проект для реализации второго этапа оптимизации регулятора (отыскание худшей модели объекта):

1 — формирователь задания; 2 — вычитающий элемент; 3 — найденная на первом этапе модель регулятора; 4 — перестраиваемая модель объекта; 5 — осциллограф; 6 — оценщик стоимостной функции; 7 — формирователь стартовых значений; 8 — оптимизатор в режиме поиска максимума

Fig. 4. The project for implementation of the second stage of the regulator optimization (the search of the worst model of the object):

1 — the setpoint former; 2 — the subtraction element; 3 — the regulator model found at the first stage; 4 — the tunable object model; 5 — the oscilloscope; 6 — the cost function estimator; 7 — the initial conditions former; 8 — the optimizer in the maximum search mode

Проект используется для численного моделирования и оптимизации. Он содержит формирователь задания 1, вычитающий элемент 2, модель регулятора 3, модель объекта 4, осциллограф 5, оценщик стоимостной функции 6, формирователь стартовых значений 7 и оптимизатор 8. На первом этапе по структуре рис. 3 отыскивается настройка регулятора для объекта, в котором все параметры занимают средние значения из области своих допустимых значений. На втором этапе с этим регулятором отыскивается такой набор параметров объекта, при котором исходная стоимостная функция принимает максимальное значение.

Если программное средство для решения задачи позволяет осуществлять оптимизацию только путем отыскания минимума стоимостной функции, как это сделано в программе *VisSim*, то на втором этапе следует использовать модифицированную функцию, которая вычисляется путем вычитания исходной стоимостной функции из большого положительного числа, заведомо большего любого значения этой стоимостной функции.

Численный пример решения поставленной задачи

Рассмотрим модель объекта в следующем виде:

$$u(s) = e^{-0,05s} \frac{1 + 2s + s^2}{a + bs + cs^2 + s^3}.$$

Здесь параметры модели объекта изменяются в следующем интервале:

$$a = 0,1...0,3; b = 0,2...0,8; c = 0,1...0,3.$$

Перепишем уравнение второй части передаточной функции (без элемента запаздывания) в следующем виде:

$$(s^2 + 2s + 1)u(s) = (s^3 + cs^2 + bs + a)x(s).$$

Далее раскроем скобки и получим:

$$s^3x + cs^2x + bsx + ax = s^2u + 2su + u.$$

Простыми преобразованиями получим соотношение для моделирования с использованием интеграторов:

$$x = \frac{1}{s} \left\{ u - cx + \frac{1}{s} \left[2u - bx + \frac{1}{s} (u - ax) \right] \right\}.$$

Моделирование этой части модели объекта по данному соотношению позволяет наиболее просто изменять ее коэффициенты.

Для оптимизации предлагается использовать следующую целевую функцию:

$$F_1(T) = \int_0^T \{f_{11}(t) + k_w f_{12}(t)\} dt,$$

$$f_{11}(t) = |e(t)|t; f_{12}(t) = \max \left\{ 0, e(t) \frac{de(t)}{dt} \right\}.$$

Здесь T — время моделирования процесса; $f_{11}(t)$ — основное ядро стоимостной функции; $f_{12}(t)$ — показатель роста ошибки, который принимает нулевое значение, если произведение ошибки на ее производную отрицательно, и равен этому произведению, если оно положительно; k_w — весовой коэффициент; $e(t)$ — ошибка управления.

На рис. 5 показан проект для первого этапа решения в программе *VisSim*. Найденные значения коэффициентов ПИД регулятора показаны в соответствующих блоках дисплея, они равны: $K_p = 7,49$, $K_I = 1,86$, $K_D = 0,607$. На рис. 6

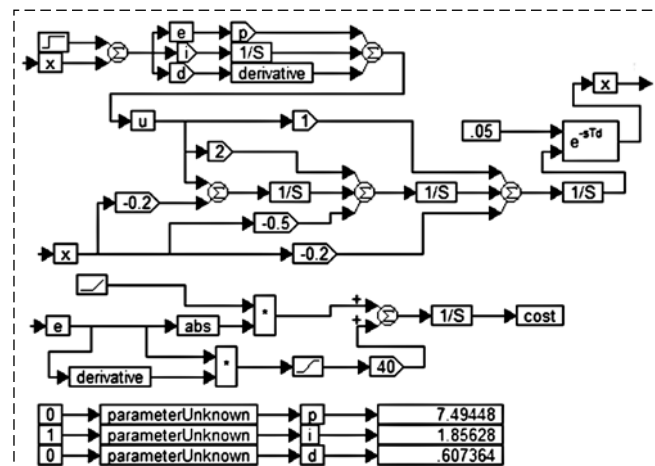


Рис. 5. Проект для первого этапа решения в программе *VisSim*
Fig. 5. The project for the first stage of the solution in *VisSim* software

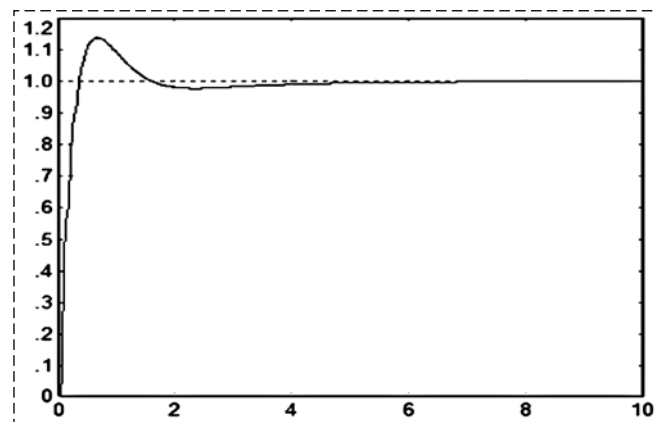


Рис. 6. Переходный процесс в системе после оптимизации ПИД регулятора
Fig. 6. The transient process in the system after optimization of the PID regulator

показан переходный процесс в системе после оптимизации ПИД регулятора.

На рис. 7 показан проект для отыскания наихудшего сочетания коэффициентов модели объекта.

Здесь потребовалось следующее изменение стоимостной функции. Во-первых, в нее введены слагаемые, которые ограничивают область поиска заданной границей допустимых изменений для каждого интервала. Во-вторых,

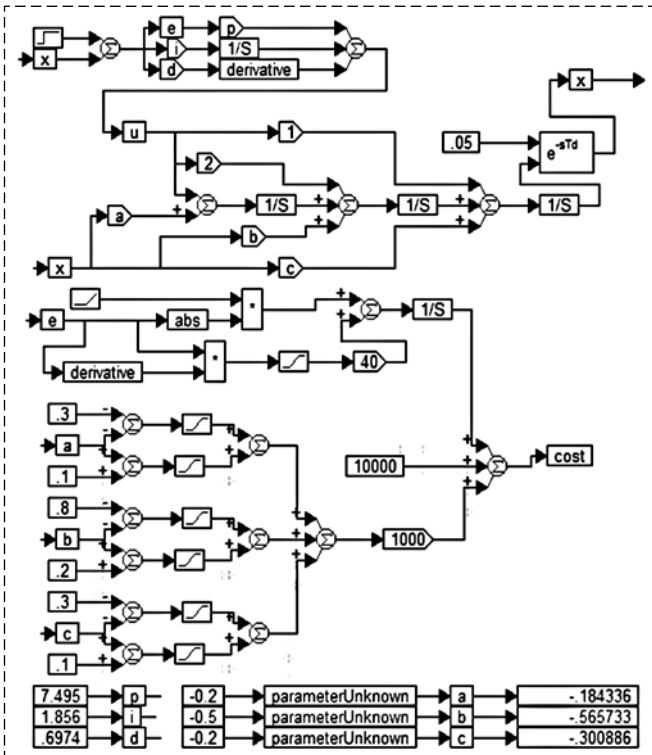


Рис. 7. Проект для отыскания наихудшего сочетания коэффициентов модели объекта
Fig. 7. The project for search of the worst combination of the object model coefficients

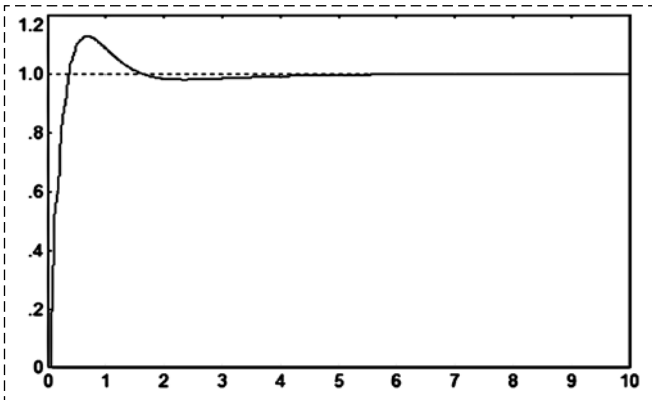


Рис. 8. Переходный процесс для сочетания параметров объекта в системе с регулятором, коэффициенты которого найдены на первом этапе
Fig. 8. The transient process for the object parameters combination in the system with the regulator coefficients found at the first stage

исходная стоимостная функция взята с обратным знаком. В-третьих, для того чтобы стоимостная функция всегда оставалась положительной, к ней добавлена большая положительная константа.

Найденные коэффициенты таковы: $a = 0,184336$; $b = 0,565733$; $c = 0,300$. На рис. 8 показан переходный процесс для этого сочетания параметров объекта в системе с регулятором, коэффициенты которого найдены на первом этапе.

На рис. 9 показан проект для отыскания коэффициентов регулятора для случая наихудшей модели объекта. Результат в виде окончательных значений коэффициентов регулятора показан в дисплеях значений, а именно: $K_P = 7,69$; $K_I = 1,65$; $K_D = 0,59$. На рис. 10 показано се-

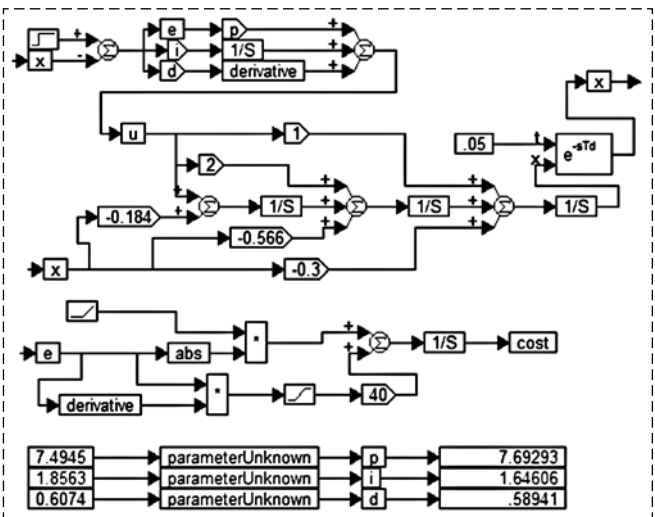


Рис. 9. Проект поиска коэффициентов регулятора для наихудшей модели объекта
Fig. 9. The project for search of regulator coefficients for the worst model of the object

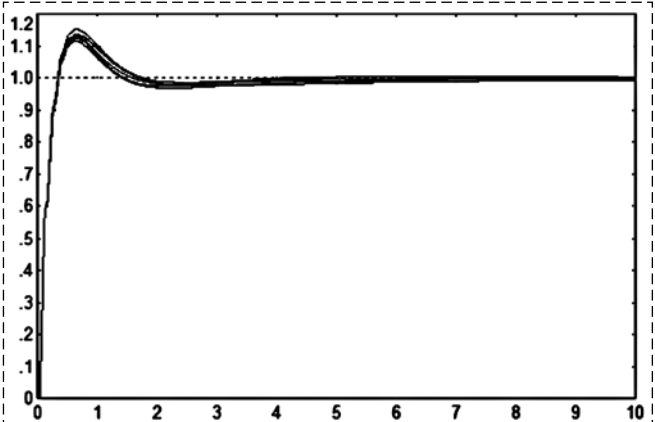


Рис. 10. Семейство переходных процессов при различных значениях параметров объекта, включая найденное наихудшее значение и крайние значения
Fig. 10. The family of transient processes at the different values of the object parameters including the worst one found and the bound values

мейство переходных процессов при различных значениях параметров объекта, включая найденное наихудшее значение и крайние значения параметров. Видно, что разница в графиках несущественна.

Обсуждение и выводы

График, который соответствует рассчитанному наихудшему сочетанию параметров объекта, возможно, не является самым худшим по каким-либо отдельным критериям, например, перерегулирование в этом случае не самое большое. Можно было бы с новым рассчитанным регулятором повторить процедуру. Однако полученные результаты можно признать вполне удовлетворительными, регулятор действительно получился робастным, поскольку графики переходных процессов (см. рис. 10) отличаются несущественно.

В данной статье впервые предложен метод проектирования робастного регулятора путем отыскания наихудшей возможной модели объекта методом численной оптимизации с последующим отысканием наилучшего регулятора для этого случая также методом численной оптимизации. В первом случае оптимизация осуществляется по измененному критерию оптимальности, который формируется в виде разности между фиксированной большой величиной и релевантной целевой функции. Также в целевую функцию вводятся слагаемые, резко возрастающие, если параметр модели объекта выходит за пределы своих допустимых границ, что позволяет задачу глобального поиска трансформировать в задачу локального поиска. Два последовательных этапа дают в итоге робастный регулятор, если для поставленной задачи таковой существует. Методом численной оптимизации продемонстрирована на численном примере работоспособность и достаточная эффективность предложенного метода. Дальнейшие исследования позволят определить область применения этого метода и его эффективность для наиболее сложных задач.

Список литературы

1. Veselý V. A new method to robust controller design // Proc. of 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC). Tatranska Lomnica. 2016. P. 779–781.
2. Oliveira V. A., Tognetti E. S., Siqueira D. Robust controllers enhanced with design and implementation processes // Proc. of IEEE Transactions on Education. 2011. Vol. 49, N. 3. P. 370–382.
3. Vitecek A., Viteckova M. Robust control of mechanical systems // Proc. of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC). Szilvasvarad. 2015. P. 575–579.
4. Chesi G. Convex Synthesis of Robust Controllers for Linear Systems with Polytopic Time-Varying Uncertainty // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62, N. 1. P. 337–349.
5. Astudillo A., Bacca B., Rosero E. Optimal and robust controllers design for a smartphone-based quadrotor // Proc. of 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). Cartagena. 2017. P. 1–6.
6. Vardhana P. H., Kumar B. K., Kumar M. A robust controller for DSTATCOM // In: 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Lisbon, 2009. P. 546–551.
7. Molins C., Garcia-Sanz M. Automatic loop shaping of QFT robust controllers // Proc. of the IEEE 2009 National Aerospace & Electronics Conference (NAECON), Dayton, OH. 2009. P. 103–110.
8. Ny J. Le, Pappas G. J. Sequential composition of robust controller specifications // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, MN. 2012. P. 5190–5195.
9. Ebihara Y., Peaucelle D., Arzelier D., Hagivara T. Robust H2 performance Analysis of Uncertain LTI Systems via Polynomially Parameter Dependent Lyapunov functions // Proc. of IFAC Symp. ROCOND'06. 2006.
10. Oliveira R. C. L. F., Peres P. L. D. LMI Conditions for robust stability analysis based on Polynomial Parameter Dependent Lyapunov functions // Systems and Control Letters. 2006. Vol. 55. P. 52–61.
11. Veselý V., Rosinová D. Robust PID-PSD Controller design: BMI approach // Asian Journal of Control. 2012. Vol. 15. P. 469–478.
12. Chesi G. LMI techniques for optimization over polynomials in control: A survey // IEEE Trans. Autom. Control. 2010. Vol. 55, N. 11. P. 2500–2510.
13. Chesi G. Sufficient and necessary LMI conditions for robust stability of rationally time-varying uncertain systems // IEEE Trans. Autom. Control. 2013. Vol. 58, N. 6. P. 1546–1551.
14. Geromel J. C., Colaneri P. Robust stability of time varying polytopic systems // Syst. Control Lett. 2006. Vol. 55, N. 1. P. 81–85.
15. Scheiderer C., Putinar M., Sullivant S. Positivity and sums of squares: A guide to some recent results // in Emerging Applications of Algebraic Geometry. New York, NY USA: Springer–Verlag, 2009. Vol. 149. P. 271–324.
16. Cedro L. Identification of an electrically driven manipulator using the differential filters – input error method // Acta Mechanica et Automatica. 2012. Vol. 6, N. 2. P. 23–27.
17. Lewis F. L., Dawson D. M., Abdallah Ch. T. Robot Manipulator Control in Theory and Practice. New York: Marcel Dekker, 2006.
18. Liu H., Wang X. Quaternion-based robust attitude control for quadrotors // 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 920–925.
19. Lopez R., Gonzalez-Hernandez I., Salazar S., Rodriguez A. E., Ordaz J. J., Osorio. Disturbance rejection for a Quadrotor aircraft through a robust control // In Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 409–415.
20. Jung J., Jung Y., You D., Shim D. H. A flight control system design for highly unstable unmanned combat aerial vehicles // In Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 1117–1125.
21. Kohno S., Uchiyama K. Design of robust controller of fixed-wing UAV for transition flight // In Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 1111–1116.
22. Shang B., Liu J., Zhao T., Chen Y. Fractional order robust visual servoing control of a quadrotor UAV with larger sampling period // In Proc. of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2016. Vol. 1, N. 209. P. 1228–1234.
23. Salazar S., Gonzalez-Hernandez I., Lopez R., Lozano R. Simulation and robust trajectory tracking for a Quadrotor UAV // In Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 1167–1174.
24. Pearce C., Guckenberger M., Holden B., Leach A., Hughes R., Xie C., Hassett M., Adderley A., Barnes L. E., Sherriff M.,

Lewin G. C. Designing a spatially aware automated quadcopter using an Android control system // In Proc. of 2014 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS). 2014. P. 23–28.

25. Bjälemark A., Bergkvist H. Quadcopter control using Android based sensing // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2014. P. 15–21.

26. Loianno G., Cross G., Qu C., Mulgaonkar Y., Hesch J. A., Kumar V. Flying Smartphones: Automated flight enabled by consumer electronics // IEEE Robotics Automation Magazine. 2015. Vol. 22. P. 24–32.

27. Aldrovandi L., Hayajneh M., Melega M., Furci M., Naldi R., Marconi L. A smartphone based quadrotor: Attitude and position estimation // In Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 1251–1259.

28. Bryant P., Gradwell G., Claveau D. Autonomous UAS controlled by onboard smartphone // In Proc. of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2015. P. 451–454.

29. Заворин А. Н., Новицкий С. П., Жмуд В. А., Ядрышников О. Д., Поллер Б. В. Синтез робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 2(47). С. 196–200.

30. Заворин А. Н., Полищук А. В., Ядрышников О. Д., Жмуд В. А. Проектирование робастных регуляторов методом численной оптимизации их параметров для ансамбля объектов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 1(67). С. 15–24.

31. Жмуд В. А., Заворин А. Н., Полищук А. В., Ядрышников О. Д. Проектирование робастных регуляторов для управления тепловыми процессами паронагревателя мето-

дом численной оптимизации их параметров для ансамбля моделей систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 2(104). С. 47–55.

32. Жмуд В. А., Семибаламут В. М., Димитров Л. В. Робастное проектирование ресурсосберегающего двухканального регулятора для объекта с одним выходом // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1(11). С. 22–28.

33. Zemtsov N. S., Hlava J., Frantsuzova G. A. Using the robust PID controller to manage the population of thermostatically controlled loads // Proc. of Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM): proc., Chelyabinsk: IEEE, 2017. 4 p.

34. Zhmud V., Prokhorenko E., Liapidevskiy A. B. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. // Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010. Phuket, 2010. P. 27–32.

35. Zhmud V. A., Zavorin A. N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati // Italian Science Review. 2014. N. 4(13). P. 686–689.

36. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators // Proceedings — 2012 7th International Forum on Technology (IFOST 2012), proc., Tomsk, 18–21 Sept. 2012. IEEE, 2012. Art. 6357804 (5 p.).

37. Zhmud V. A., Reva I. L., Dimitrov L. V. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803. Art. 012185 (6 p.). (International conference on information technologies in business and industry, Tomsk, 21–26 Sept. 2016).

Synthesis of Robust PID Controllers by Double Optimization Method

V. A. Zhmud, oao_nips@bk.ru, A. S. Vostrikov, a.s.vostrikov@gmail.com, A. Yu. Ivoilov, iau13hv@mail.ru, G. V. Sablina, sablina@corp.nstu.ru,

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Corresponding author: Ivoilov Andrei Yu., PhD-student of Department of Automation, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, e-mail: iau13hv@mail.ru

Accepted on September 26, 2019

Abstract

The design of adaptive controllers allows to solve the problem of control of the object with non-stationary parameters. However, if the parameters of the object do not change too much or if only a certain interval of their change is known, it may turn out that an adaptive controller is not required, since the problem can be solved with the help of a robust controller. The robust controller allows to provide an acceptable quality of control even if the parameters of the mathematical model of the object change in some predetermined interval. A method of designing such controllers is known as the method of numerical optimization of the controllers used in the ensemble of systems in which the models of objects are different and the models of controllers are identical. The ensemble uses object models with extreme parameter values. The disadvantages of this method are too many systems that need to be modeled and optimized at the same time if there are several parameters to be changed. In addition, the worst combination of model parameters may not be boundary, but middle, in this case this method is not applicable. This article offers and analyzes an alternative method of designing a robust controller on a numerical example. The essence of this method is the numerical optimization of the regulator for the model with the worst combination of the values of all modifiable parameters. The search for the worst combination of parameters is also carried out using the method of numerical optimization. In this case, a combination of model parameters is found in which the best relation of regulator coefficients gives the worst result of the system. The problem is solved in several optimization cycles with alternating cost functions. The utility of the method is illustrated numerically by an example of a third order dynamic object with a series linked delay element.

Keywords: numerical optimization, regulation, robust system, simulation, mathematical model, object, PID controller

For citation:

Zhmud V. A., Vostrikov A. S., Ivoilov A. Yu., Sablina G. V. Synthesis of Robust PID Controllers by Double Optimization Method,

Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 67–73.

DOI: 10.17587/mau.21.67-73

1. Veselý V. A new method to robust controller design, *Proc. of 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Tatranska Lomnica, 2016, pp. 779–781.
2. Oliveira V. A., Tognetti E. S., Siqueira D. Robust controllers enhanced with design and implementation processes, *Proc. of IEEE Transactions on Education*, 2011, vol. 49, no. 3, pp. 370–382.
3. Vitecek A., Viteckova M. Robust control of mechanical systems, *Proc. of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Szilvasvarad, 2015, pp. 575–579.
4. Chesi G. Convex Synthesis of Robust Controllers for Linear Systems with Polytopic Time-Varying Uncertainty, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 337–349.
5. Astudillo A., Bacca B., Rosero E. Optimal and robust controllers design for a smartphone-based quadrotor, *Proc. of 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, Cartagena, 2017, pp. 1–6.
6. Vardhana P. H., Kumar B. K., Kumar M. A robust controller for DSTATCOM, In: *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Lisbon, 2009, pp. 546–551.
7. Molins C., Garcia-Sanz M. Automatic loop shaping of QFT robust controllers, *Proc. of the IEEE 2009 National Aerospace & Electronics Conference (NAECON)*, Dayton, OH, 2009, pp. 103–110.
8. Ny J. Le, Pappas G. J. Sequential composition of robust controller specifications, *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, 2012, pp. 5190–5195.
9. Ebihara Y., Peaucelle D., Arzelier D., Hagivara T. Robust H2 performance Analysis of Uncertain LTI Systems via Polynomially Parameter Dependent Lyapunov functions, *Proc. of IFAC Symp. RO-COND'06*, 2006.
10. Oliveira R. C. L. F., Peres P. L. D. LMI Conditions for robust stability analysis based on Polynomial Parameter Dependent Lyapunov functions, *Systems and Control Letters*, 2006, vol. 55, pp. 52–61.
11. Veselý V., Rosinová D. Robust PID-PSD Controller design: BMI approach, *Asian Journal of Control*, 2012, vol. 15, pp. 469–478.
12. Chesi G. LMI techniques for optimization over polynomials in control: A survey, *IEEE Trans. Autom. Control*, 2010, vol. 55, no. 11, pp. 2500–2510.
13. Chesi G. Sufficient and necessary LMI conditions for robust stability of rationally time-varying uncertain systems, *IEEE Trans. Autom. Control*, 2013, vol. 58, no. 6, pp. 1546–1551.
14. Geromel J. C., Colaneri P. Robust stability of time varying polytopic systems, *Syst. Control Lett.*, 2006, vol. 55, no. 1, pp. 81–85.
15. Scheiderer C., Putinar M., Sullivant S. Positivity and sums of squares: A guide to some recent results // in *Emerging Applications of Algebraic Geometry* New York NY USA: Springer-Verlag, 2009, vol. 149, pp. 271–324.
16. Cedro L. Identification of an electrically driven manipulator using the differential filters — input error method // *Acta Mechanica et Automatica*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 23–27.
17. Lewis F. L., Dawson D. M., Abdallah Ch. T. Robot Manipulator Control in Theory and Practice, New York, Marcel Dekker, 2006.
18. Liu H., Wang X. Quaternion-based robust attitude control for quadrotors, *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 920–925.
19. Lopez R., Gonzalez-Hernandez I., Salazar S., Rodriguez A. E., Ordaz J. J., Osorio. Disturbance rejection for a Quadrotor aircraft through a robust control, In *Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 409–415.
20. Jung J., Jung Y., You D., Shim D. H. A flight control system design for highly unstable unmanned combat aerial vehicles, In *Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 1117–1125.
21. Kohno S., Uchiyama K. Design of robust controller of fixed-wing UAV for transition flight, In *Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 1111–1116.
22. Shang B., Liu J., Zhao T., Chen Y. Fractional order robust visual serving control of a quadrotor UAV with larger sampling period, In *Proc. of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2016, vol. 1, no. 209, pp. 1228–1234.
23. Salazar S., Gonzalez-Hernandez I., Lopez R., Lozano R. Simulation and robust trajectory tracking for a Quadrotor UAV, In *Proc. of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 1167–1174.
24. Pearce C., Guckenberger M., Holden B., Leach A., Hughes R., Xie C., Hassett M., Adderley A., Barnes L. E., Sherriff M., Lewin G. C. Designing a spatially aware automated quadcopter using an Android control system, In *Proc. of 2014 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, 2014, pp. 23–28.
25. Bjälemark A., Bergkvist H. Quadcopter control using Android based sensing, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2014, pp. 15–21.
26. Loianno G., Cross G., Qu C., Mulgaonkar Hesch J. A., Kumar V. Flying Smartphones: Automated flight enabled by consumer electronics, *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2015, vol. 22, pp. 24–32.
27. Aldrovandi L., Hayajneh M., Melega M., Furci M., Naldi R., Marconi L. A smartphone based quadrotor: Attitude and position estimation, In *Proc. of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 1251–1259.
28. Bryant P., Gradwell G., Claveau D. Autonomous UAS controlled by onboard smartphone, In *Proc. of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015, pp. 451–454.
29. Zavorin A. N., Novickij S. P., Zhmud V. A., Yadrishnikov O. D., Poller B. V. The synthesis of the robust controller by double iterative parallel numerical optimization method, *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 2, vol. 47, pp. 196–200 (in Russian).
30. Zavorin A. N., Polishchuk A. V., Yadrishnikov O. D., Zhmud V. A. The development of robust regulators by a method of numerical optimization of their parameters for an ensemble of objects, *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1, vol. 67, pp. 15–24 (in Russian).
31. Zhmud V. A., Zavorin A. N., Polishchuk A. V., Yadrishnikov O. D. The development of robust regulators for control of thermal processes of a steam heater by a method of numerical optimization of their parameters for an ensemble of system models, *Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tekhnologij*, 2013, no. 2, vol. 104, pp. 47–55 (in Russian).
32. Zhmud V. A., Semibalmut V. M., Dimitrov L. V. The robust development of the resource saving dual channel regulator for an object with a single input, *Avtomatika i Programmnyaya Inzheneriya*, 2015, no. 1, vol. 11, pp. 22–28 (in Russian).
33. Zemtsov N. S., Hlava J., Frantsuzova G. A. Using the robust PID controller to manage the population of thermostatically controlled loads, *Proc. of Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*: proc., Chelyabinsk, IEEE, 2017, 4 p.
34. Zhmud V., Prokhorenko E., Liapidevskiy A. B. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6, *Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010*, Phuket, 2010, pp. 27–32.
35. Zhmud V. A., Zavorin A. N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati, *Italian Science Review*, 2014, no. 4 (13), pp. 686–689.
36. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators, *Proceedings — 2012 7th International Forum on Technology (IFOST 2012)*, proc., Tomsk, 18–21 Sept. 2012, IEEE, 2012, Art. 6357804 (5 p.).
37. Zhmud V. A., Reva I. L., Dimitrov L. V. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, Art. 012185 (6 p.) (International conference on information technologies in business and industry, Tomsk, 21–26 Sept. 2016).