

УДК 621.317

## УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ С ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ\*

Н.А. МАЛЫШКИН

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: nickmyname@ngs.ru

Численная оптимизация коэффициентов регулятора в последнее время широко применяется для проектирования замкнутых систем автоматического управления [1–12]. При этом метод проектирования требует следующего: а) наличия модели объекта; б) использования программы для моделирования и оптимизации; в) выбора целевой (стоимостной) функции; г) выбора структуры регулятора; д) выбора шага интегрирования и времени интегрирования; е) выбора метода оптимизации из предложенного программой набора. Это позволяет запустить процедуру оптимизации. Если результат не удовлетворяет разработчика, следует что-либо изменить в этом наборе. Рассмотренная методика не применялась ранее к объекту, в котором имеется более одной внутренней положительной обратной связи с запаздыванием. Примером таких объектов может служить любой объект, обладающий паразитным откликом с обратной связью, что, например, часто имеет место в акустических системах, включая системы общения через сеть Интернет, таких как Skype. Особенностью такого объекта является наличие запаздывающего отклика, который может приходиться существенно позже кажущегося окончания переходного процесса. Это накладывает свой отпечаток на требования к выбору времени моделирования при оптимизации. В статье показано, что выбор этого времени может существенно изменить результат оптимизации и, следовательно, вид получаемого переходного процесса в системе. Приводятся рекомендации по использованию анализируемого метода в этом случае.

**Ключевые слова:** автоматика, регулятор, моделирование, теория автоматического управления, численная оптимизация, устойчивость, качество переходного процесса

DOI: 10.17212/2307-6879-2014-4-31-40

## ВВЕДЕНИЕ

Управление объектами в контуре с отрицательной обратной связью широко применяется в самых различных отраслях науки и техники. При этом все чаще для расчета регулятора применяется метод численной оптимизации его коэффициентов [1–12]. Этот метод предполагает выбор ряда параметров для

---

\* Статья получена 04 августа 2014 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

оптимизации, поэтому, естественно, результат оптимизации зависит от этого выбора (не считая выбора метода оптимизации, т. е. метода поиска значений аргументов, при которых целевая функция достигает своего минимума). В частности, на результат оптимизации прежде всего влияет целевая функция. В работах [1–12] выбору целевой функции уделяется достаточно внимания. Оптимизация может быть как минимум двух видов: в первом случае отыскиваются значения параметров, обращающих целевую функцию в нуль, во втором случае отыскиваются параметры, обеспечивающие экстремум целевой функции. В первом случае целевую функцию можно называть невязкой, во втором случае, если отыскивается ее минимум, ее называют стоимостной функцией, а если отыскивается ее максимум, ее можно назвать функцией прибыли.

Методы оптимизации, описанные в [1–12], используют стоимостную функцию на основе интеграла по времени от модуля ошибки, или на ее модификации за счет введения дополнительных сомножителей и (или) слагаемых. Кроме выбора целевой (стоимостной) функции на результат оптимизации влияют выбор структуры регулятора и выбор шага и времени интегрирования. Исследованию влияния времени интегрирования на результат оптимизации в литературе уделено недостаточно внимания. Настоящая статья исследует это влияние на примере объекта, содержащего несколько внутренних контуров с положительной обратной связью. Данные контуры содержат запаздывание, но не нарушают устойчивость объекта, так как коэффициент усиления в них меньше единицы, однако они подводят объект близко к границе устойчивости, поскольку этот коэффициент соизмерим с единицей.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим объект, структурная схема которого дана на рис. 1. В объекте имеются две положительные обратные связи, что приводит его к границе устойчивости. На рис. 2 показан отклик объекта на ступенчатое единичное воздействие. Дополнительная сложность управления таким объектом заключается в наличии запаздывания в обратных связях внутри объекта. Поэтому в начале переходного процесса эти обратные связи не действуют, а включаются лишь по истечении соответствующего времени, которое равно 0,05 с для первой связи и 9,05 с для второй связи.

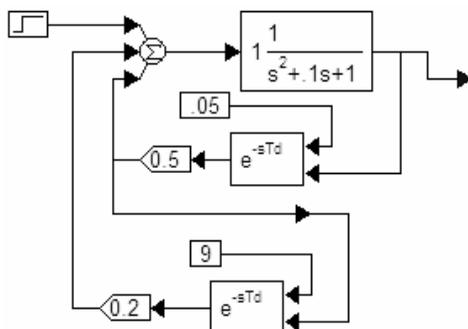


Рис. 1. Структурная схема объекта

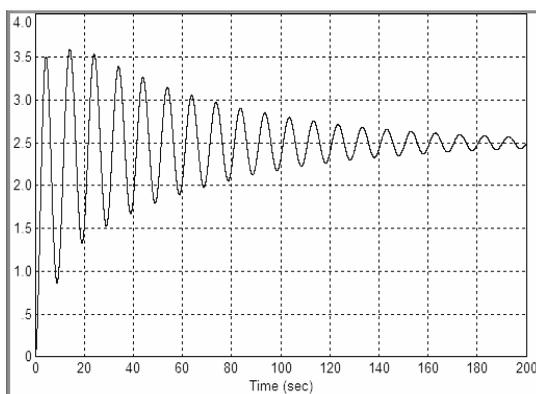


Рис. 2. Отклик объекта на единичный скачок

## 2. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ

Структурная схема для моделирования и оптимизации в программе *VisSim* показана на рис. 3. Полученные коэффициенты регулятора, как видно из рис. 3, равны:  $K_{\text{П}} = 6,95$ ;  $K_{\text{И}} = 0,437$ ;  $K_{\text{Д}} = 5,179$ . Переходный процесс, показанный на этом же рисунке, на первый взгляд кажется вполне приемлемым. Действительно, перерегулирование отсутствует, длительность процесса составляет не более 15 с, а время вхождения в зону малой ошибки не превышает 2,5 с. Однако детальное рассмотрение этого процесса на рис. 3 показывает, что ошибка длительное время не уменьшается, что говорит о малой эффективности управления на интервале от 2 до 11 с.

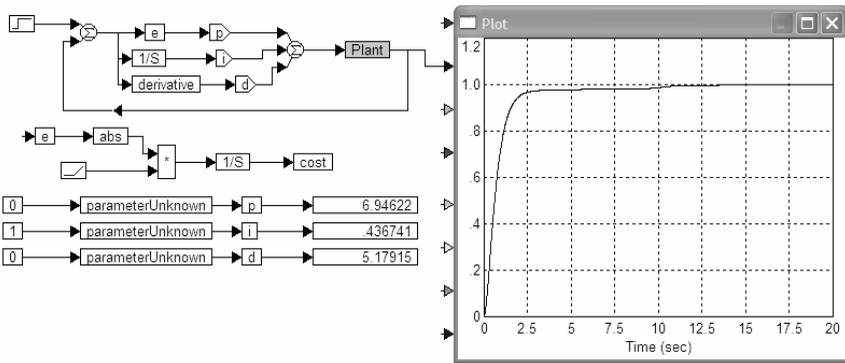


Рис. 3. Структурная схема системы с ПИД-регулятором, результат моделирования и оптимизации в виде графиков и коэффициентов регулятора

Отметим, что в целевую (стоимостную) функцию введено умножение модуля ошибки на время с начала переходного процесса. Результат умножения интегрируется на интервале от начала переходного процесса до времени завершения моделирования, поэтому выбор времени моделирования существенно влияет на результат оптимизации.

Для подавления указанного неэффективного участка можно предложить сократить время моделирования до 10 с. На рис. 5 показаны результат оптимизации и полученные коэффициенты регулятора, они равны:  $K_P = 11,18$ ;  $K_I = 1,014$ ;  $K_D = 5,468$ .

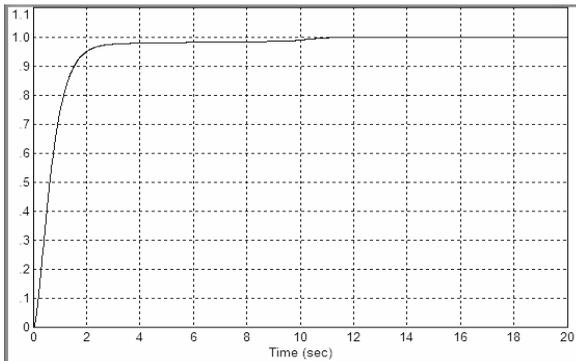


Рис. 4. Укрупненный вид переходного процесса после первой процедуры оптимизации при выборе времени моделирования 20 с

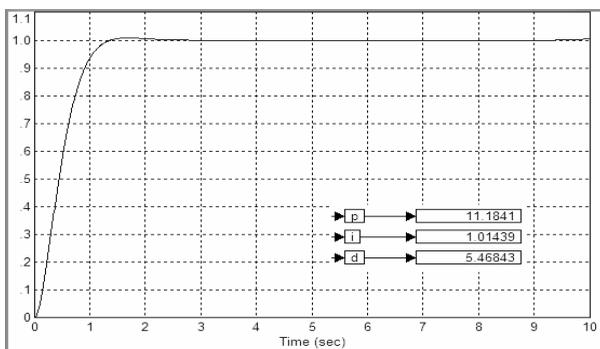


Рис. 5. Вид переходного процесса после второй процедуры оптимизации при выборе времени моделирования 10 с

На первый взгляд, полученный результат на рис. 5 намного привлекательней результата на рис. 4, но следует рассмотреть, как развивается переходный процесс по истечении времени запаздывания второго внутреннего контура обратной связи в объекте. На рис. 6 показан в укрупненном масштабе переходный процесс на интервале моделирования, равном 40 с. Видно, что через 9 с после начала переходного процесса в системе развивается дополнительный (паразитный) переходный процесс. Небольшая величина этого скачка не принципиальна, поскольку при менее удачном сочетании запаздывания и коэффициента этого контура скачок может оказаться сколь угодно большим и даже может нарушиться устойчивость системы. Наличие двух пиков связано, по-видимому, с наличием двух контуров с запаздыванием.

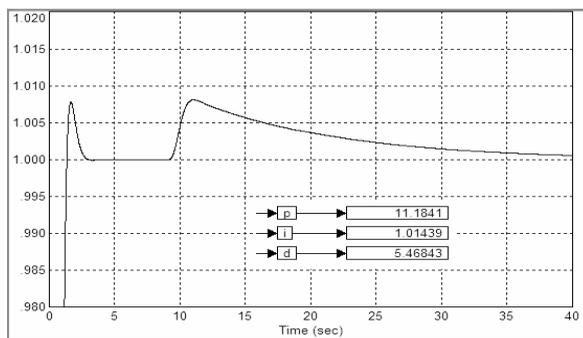


Рис. 6. Вид переходного процесса в укрупненном масштабе при времени моделирования 40 с (оптимизация делалась за 10 с)

Осуществим оптимизацию при моделировании за более длительное время, а именно за 40 с. Результат оптимизации показан на рис. 7. Видим, что перерегулирование на начальном этапе переходного процесса возросло до 11 %. Переходный процесс завершается за 11 с, если же принимать в расчет ошибку на уровне 1 %, то процесс завершается через 7–8 с. Выводы о преимуществах того или иного переходного процесса следует делать на основе технических требований к системе, поскольку в одном случае перерегулирование может оказаться недопустимым, а затягивание процесса – вполне допустимым, а в другом случае требования могут оказаться противоположными.

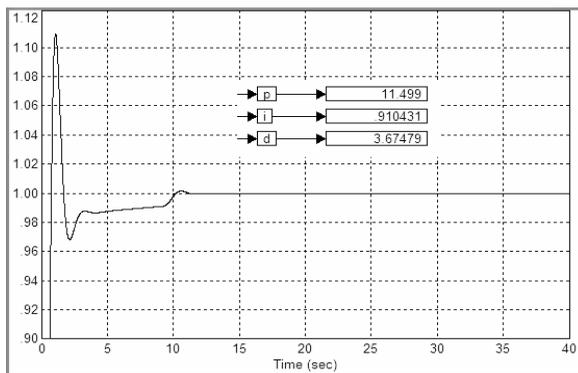


Рис. 7. Вид переходного процесса после оптимизации в укрупненном масштабе

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что время моделирования может оказывать существенное влияние на результат оптимизации. Это можно использовать для корректировки результата, и это следует учитывать для анализа результата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье исследованы возможности управления объектом с двумя положительными внутренними обратными связями, приходящими с существенным запаздыванием. Показано, что учет таких связей при моделировании

требует тщательного выбора времени моделирования: при малом времени моделирования эти связи не принимаются в расчет, поэтому кажущаяся устойчивость системы является ложной, равновесие системы нарушается после прихода задержанного отклика. При большом времени моделирования в системе может возрасти перерегулирование, но получаемый результат более полезен, поскольку система делается устойчивой. Результат может быть полезен при управлении перевёрнутым маятником, содержащим два колена.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация / В.А. Васильев, А.А. Воевода, В.А. Жмудь, В.А. Хассуонех // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 4 (46). – С. 3–10.
2. *Востриков А.С., Воевода А.А., Жмудь В.А.* Эффект понижения порядка системы при управлении по методу разделения движений // Научный вестник НГТУ. – 2005. – № 3 (21). – С. 3–13.
3. *Воевода А.А., Жмудь В.А.* Сохранение и повышение порядка асимптотического уравнения системы при управлении по методу разделения движений // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 1 (22). – С. 149–155.
4. *Воевода А.А., Жмудь В.А.* Сходимость алгоритмов оптимизации регулятора для объекта с ограничителем и с запаздыванием // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 4 (29). – С. 179–184.
5. *Zhmud V.A.* The use of the feedback control systems in laser physics researching experiments // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, Novosibirsk State Technical University, 10–13 September, 2011. – Novosibirsk, 2011. – Additional volume. – P. 40–43.
6. The modeling tests of the new PID-regulators structures / A.A. Voevoda, V.A. Zhmud, R.Y. Ishimtsev, V.M. Semibalamut // Proceedings of the 18th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009, 7–9 September 2009. – Palma de Mallorca, Spain, 2009. – P. 165–168.
7. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators / V. Zhmud, O. Yadrishnikov, A. Poloshchuk, A. Zavorin // Proceedings of the 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – Tomsk, 2012. – P. 1–4. – doi: 10.1109/IFOST.2012.6357804.
8. *Zhmud V., Liapidevskiy A., Prokhorenko E.* 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, AsiaMIC 2010, November 24–26, 2010. – Phuket, Thailand, 2010. – P. 27–32.

9. *Zhmud V., Yadrishnikov O.* Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function // Proceedings of the 8th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST–2013), 28 June–1 July, Mongolian University of Science and Technology. – Ulaanbaator, Mongolia, 2013. – Vol. 2. – P. 265–270.

10. The tuning of the PID-regulator for automatic control system of thermo energetic equipment / V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R.V. Rao // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME–2011), June 06–08, 2011. – Surat, Gujarat, India, 2011. – P. 254–263.

11. *Жмудь В.А., Заворин А.Н.* Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVI Международной конференции 30 июня–3 июля 2014 г. – Самара, 2014. – С. 557–567.

12. *Zhmud V.A., Zavorin A.N.* Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati [Electronic resource] // Italian Science Review. – 2014. – Vol. 4, iss. 13. – P. 686–689. – URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> (accessed 20.12.2014).

13. *Дьяконов В.* VisSim + Mathcad + MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.

14. *Дьяконов В.* MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 576 с.

**Николай Александрович Малышкин** – аспирант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Имеет более двух публикаций. Основные направления исследований – теория автоматического управления, электроника, оптимизация, измерительная техника. E-mail: [nickmyname@ngs.ru](mailto:nickmyname@ngs.ru)

### **Control of oscillatory objects with internal positive delayed feedback\***

---

\* Received 04 August 2014.

Work is executed at financial support of the Minobrnauka Russia state job № 2014/138, the theme of the project “New patterns, models and algorithms for breakthrough methods of control of technical systems based on high results intellectuality activity”.

## N.A. Malishkin

*Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate. E-mail: nickmyname@ngs.ru*

Numerical optimization of coefficients of regulator has recently been widely used for designing closed systems automatic control [1-12]. With all this, the method of design requires following things: a) the presence of the object model; b) using the program for the simulation and optimization; c) target (value) function choice; d) the choice of the structure of the regulator; e) the choice of the integration step and an integration time; f) the choice of method of optimization of the proposed set of the software. This allows starting the optimization procedure. If the result does not satisfy the developer demands, he should change anything in this set. Our procedure was not applied earlier to the object, which has more than one internal positive feedback with delay. Examples of such objects may be any Object with a spurious responses with feedback that, for example, measures often takes place in acoustic systems, including conversation means using Internet, such as Scipe. A feature of this object is the presence of the delayed response, which may come much later than the apparent end of the transition process. It produces its influence to the requirements for the time of modeling for optimization. The paper shows that the choice of time can significantly change the outcome of the optimization, and therefore, the view resulting transient process in the system. The paper gives recommendations on the use of the analyzed method in this case.

**Key words:** automation, control, modeling, theory of automatic control, numerical optimization, sustainability, quality of the transition process

## REFERENCES

1. Vasil'ev V.A., Voevoda A.A., Zhmud' V.A., Khassuonekh V.A. Tsifrovye regulyatory: tselevye funktsii nastroiки, vybor metoda integrirvaniya, apparatnaya realizatsiya [Digital controls: cost function, the choice of integration method, hardware implementation]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU – Transaction of Scientific Papers of Novosibirsk State Technical University*, 2006, no. 4 (46), pp. 3–10.
2. Vostrikov A.S., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Effekt ponizheniya poryadka sistemy pri upravlenii po metodu razdeleniya dvizhenii [The effect of reducing the order of the system that is controlled by the method of separation of motions]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2005, no. 3 (21), pp. 3–13.
3. Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Sokhranenie i povyshenie poryadka asimptoticheskogo uravneniya sistemy pri upravlenii po metodu razdeleniya dvizhenii [Maintenance and improvement of the order of the asymptotic equation of the system that is controlled by the method of separation of motions]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2006, no. 1 (22), pp. 149–155.

4. Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Skhodimost' algoritmov optimizatsii regulatora dlya ob'ekta s ogranichitelem i s zapazdyvaniem [The convergence of the algorithms for the optimization of regulator for an object with restriction and delay]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2007, no. 4 (29), pp. 179–184.

5. Zhmud' V.A. The use of the feedback control systems in laser physics researching experiments. Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, Novosibirsk State Technical University, 10–13 September, Novosibirsk, 2011, additional volume, pp. 40–43.

6. Voevoda A.A., Zhmud' V.A., Ishimtsev R.Y., Semibalamut V.M. The mode-ling tests of the new PID-regulators structures. 2009. Proceedings of the 18th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009, Palma de Mallorca, Spain, 7–9 September 2009, pp. 165–168.

7. Zhmud' V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Proceedings of the 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012, Tomsk, 2012, pp. 1–4. doi: 10.1109/IFOST.2012.6357804

8. Zhmud' V., Liapidevskiy A., Prokhorenko E. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, AsiaMIC 2010, Phuket, Thailand, November 24–26, 2010, pp. 27–32.

9. Zhmud' V., Yadrishnikov O. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST–2013), Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia, 28 June–1 July 2013, vol. 2, pp. 265–270.

10. Zhmud' V., Polishchuk A., Voevoda A., Rao R.V. The tuning of the PID-regulator for automatic control system of thermo energetic equipment. Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME–2011), Surat, Gujarat, India, June 06–08, 2011, pp. 254–263.

11. Zhmud' V.A., Zavorin A.N. [Method of designing energy-efficient controllers for complex objects with partially unknown model]. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh. Trudy XVI Mezhdunarodnoi konferentsii* [Problems of control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference], Samara, 2014, pp. 557–567. (In Russian)

12. Zhmud' V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. *Italian Science Review*, 2014, vol. 4, iss. 13, pp.