

# Регулятор с разделением «правильных» и «неправильных» движений

В.А. Жмудь, М.В. Трубин  
ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

**Аннотация.** При управлении объектами, склонными к колебаниям, настройка регулятора зачастую достаточно сложна. Один из эффективных методов отыскания коэффициентов регулятора при заданной структуре – метод численной оптимизации. Этот метод предполагает моделирование системы с регулятором, в котором задаются различные коэффициенты, при этом программное обеспечение обеспечивает автоматическое отыскание оптимальных значений коэффициентов, которые обеспечивают минимум заданной наперед целевой функции. Эта целевая функция, как правило, содержит интеграл от модуля или квадрата ошибки по времени, а также может содержать дополнительные неотрицательные слагаемые, которые служат для обеспечения требуемых свойств системы. Ранее нами предложено вводить слагаемое, которое возрастает при наличии в переходном процессе участков, на которых ошибка возрастает по величине. Такое слагаемое формируется из произведения ошибки на ее производную, которое пропускается через нелинейный элемент, пропускающий только положительный сигнал, и не пропускающий отрицательный (то есть ограничивает величину снизу нулевым значением). Такой детектор роста ошибки может быть использован для разделения переходного процесса на различные участки, а именно: на участки, где величина ошибки не возрастает, и на участки, где она возрастает. В данной статье предлагается для каждого из двух типов таких участков использовать индивидуально настраиваемые коэффициенты регулятора. По крайней мере, это может оказаться целесообразным для дифференцирующего и (или) пропорционального каналов регулятора, целесообразность такого разделения для интегрирующего канала сомнительна. Поэтому идея статьи состоит в том, чтобы разделить движения в системе на те, которые идут в верном направлении и на те, которые идут в неверном направлении. При этом предлагается использовать два различных регулятора – для движений в правильном направлении применять регулятор с одним набором коэффициентов, а для движений в неправильном направлении – регулятор с другим набором

коэффициентов. Правильными движениями называем такие движения, при которых ошибка уменьшается, или остается постоянной, то есть произведение ошибки на ее производную по времени отрицательно или равно нулю. Неправильными движениями называем прочие движения – когда произведение ошибки на ее производную положительно, то есть ошибка по величине возрастает. Для различия видов движения применен специальный детектор «правильности» движений.

**Ключевые слова:** регулятор, автоматика, обратная связь, быстродействие, точность, управление, переходный процесс, численная оптимизация

## ВВЕДЕНИЕ

Высокоточное управление объектами актуально во многих отраслях промышленности, техники, технологии и науки. Эти задачи решаются с помощью систем с обратной связью, в которых осуществляются соответствующие изменения входных управляющих сигналов, поступающих на объект для обеспечения требуемого значения выходных величин объекта управления. Зависимость выходной величины объекта от входного сигнала определяется его математической моделью. Часто используются модели в виде амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик, то есть зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала от частоты входного сигнала. Встречаются объекты, склонные к колебаниям выходной величины.

Для решения задачи управления такими объектами могут применяться системы с обратной связью, содержащие традиционные регуляторы с пропорциональным, интегрирующим и дифференцирующим трактами (ПИД-регуляторы). Коэффициенты этих трактов рассчитываются разными методами.

Общий вид выходного сигнала ПИД-регулятора задается уравнением:

$$U(t) = K_p E(t) + K_D \frac{dE(t)}{dt} + K_I \int_{t_0}^t E(t) dt. \quad (1)$$

Здесь  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  – коэффициенты усиления пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего каналов регулятора.

Проектирование регулятора состоит в этом случае в вычислении таких значений этих коэффициентов, которые обеспечат требуемое быстродействие, точность и устойчивость системы. Например, они могут быть рассчитаны методом численной оптимизации [1].

При управлении объектами, склонными к колебаниям, поиск регулятора может оказаться чрезвычайно сложным. Например, процедура численной оптимизации может не привести к отысканию коэффициентов регулятора, которые бы обеспечили достаточное быстродействие с достаточно высоким качеством переходного процесса. Качество переходного процесса оценивается по следующим параметрам: а) наличие или отсутствие перерегулирования, а в случае его наличия – его величина; б) монотонность или немонотонность переходного процесса до начала первого достижения предписанного уровня; в) количество колебаний около предписанного равновесного состояния и скорость их затухания (то есть отношение амплитуд двух последующих колебаний). Также переходные процессы характеризуются их длительностью и остаточной статической ошибкой.

Недостаточно высокое качество переходного процесс может проявляться, например, в большом перерегулировании, или в большом количестве колебаний и, соответственно, слабом их затухании, или в немонотонности переходного процесса на начальном участке. В настоящей статье ставится задача отыскания метода дальнейшего повышения качества переходного процесса при управлении объектами, склонными к колебаниям.

## 1. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Предлагается решение поставленной задачи решается путем разделения переходного процесса на два вида, а именно: а) на участки, где величина ошибки убывает или постоянна; б) на участки, на которых величина ошибки возрастает.

Для определения таких участков необходим соответствующий детектор.

Один из вариантов схемы такого детектора показан на Рис. 1.

С учетом такого детектора предлагается система, показанная на Рис. 2.

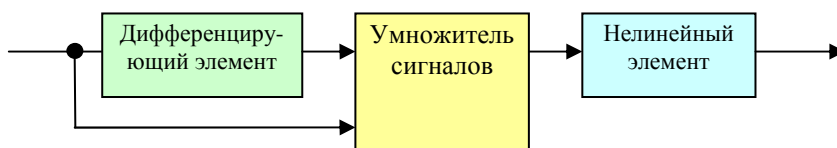


Рис. 1. Детектор

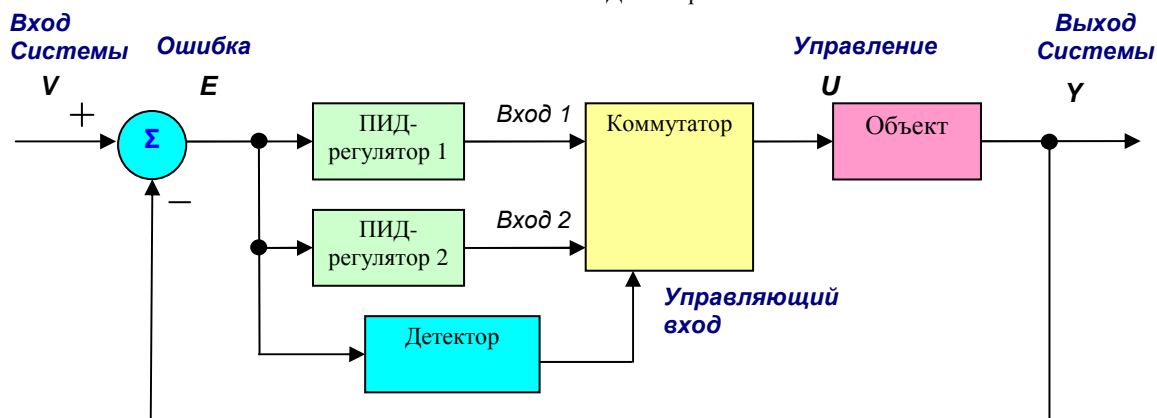


Рис. 2. Предлагаемая система

Предлагаемая система работает следующим образом. В исходном состоянии коммутатор подключает на свой выход, а значит и на вход объекта один из своих входов, то есть выход одного из регуляторов, первого или второго. Таким образом, контур управления системы получается замкнутым с использованием одного из двух регуляторов. Этот контур работает как в любой системе с обратной связью, а именно: выходной сигнал объекта вычитается из входного сигнала системы, получаемая на

выходе вычитающего устройства разница является сигналом ошибки  $E(t)$ . Этот сигнал ошибки преобразуется одним из регуляторов в управляющий сигнал, который поступает через коммутатор на вход объекта и воздействует на него так, чтобы изменить его выходной сигнал в нужную сторону. Вследствие действия обратной связи выходной сигнал объекта становится равным предписанному значению, поступающему на вход системы. При этом детектор анализирует сигнал ошибки с

выхода вычитающего устройства и на его основе формирует логический сигнал, который управляет работой коммутирующего устройства. В зависимости от этого сигнала на выход этого коммутирующего устройства поступает сигнал с его первого или с его второго входа. Детектор в зависимости от того, уменьшается ли она по величине, или не уменьшается, подключает первый или второй регулятор. Оба этих регулятора заранее настраиваются методом численной оптимизации в составе схемы, реализующей такое переключение.

Теоретическое обоснование этого метода можно дать на основе следующих соображений. Поскольку «правильные» и «неправильные» изменения выходного сигнала объекта в составе системы могут чередоваться, можно это трактовать, как чередование «правильной» и «неправильной» работы регулятора. Поэтому может быть поставлен вопрос о корректировке «неправильной» работы регулятора путем изменения его коэффициентов. Для проверки продуктивности этой идеи достаточно

осуществить моделирование такой системы, при этом оба регулятора могут иметь одинаковые математические модели, но различные коэффициенты усиления, которые определяются методом численной оптимизации. Если указанный метод не эффективен, то процедура численной оптимизации должна давать одинаковые коэффициенты для обоих регуляторов, поскольку переключение регуляторов не приводит к снижению величины целевой функции. Если моделирование показывает, что всегда процедура дает разные коэффициенты для двух регуляторов, то это можно считать подтверждением эффективности метода для исследованных видов регуляторов.

Данная система может быть дополнительно усовершенствована, как показано на Рис. 3.

Положительный эффект такого усовершенствования состоит в том, что нет необходимости переключать интегральный тракт регулятора. Поэтому предлагается этот тракт регулятора включить помимо коммутатора, непосредственно на вход объекта, но сумматор для этих целей необходим.

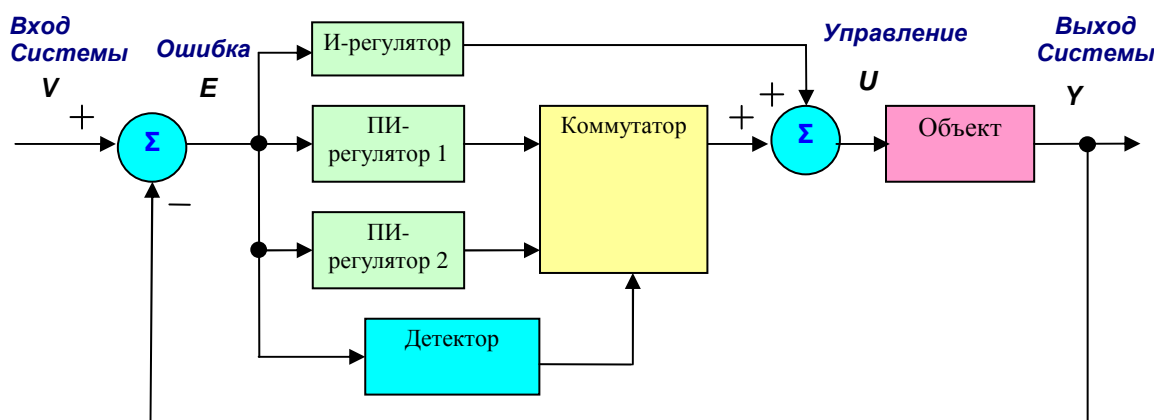


Рис. 3. Усовершенствованный вариант предлагаемой системы

Предлагаемая система, показанная на Рис. 3, с учетом внутренней структуры, проще, чем система, показанная на Рис. 2, поскольку в системе по Рис. 2 в каждом из регуляторов имеется по тракту, и по одному сумматору с тремя входами, а в системе по Рис. 3 в каждом из этих регуляторов имеется только по два тракта и по одному сумматору на два входа. При этом в системе по Рис. 2 имеется шесть настраиваемых параметров, а в системе по Рис. 3 таких параметров только пять (интегральный регулятор имеет постоянный коэффициент). Отметим, что упрощение не является самоцелью: традиционный ПИД-регулятор еще проще, но в структуре по Рис. 3 все же предполагается положительный эффект, который оправдывает это усложнение.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА

Для иллюстрации эффективности предлагаемого метода осуществлено моделирование такой системы по структуре, показанной на Рис. 3. При этом математическая модель объекта задана в виде передаточной функции следующего вида:

$$W_o(s) = \frac{1}{s^3 + s^2 + s + 1}. \quad (2)$$

Здесь  $s$  – аргумент преобразования Лапласа, аналогичный оператору дифференцирования при описании объекта в форме дифференциальных уравнений.

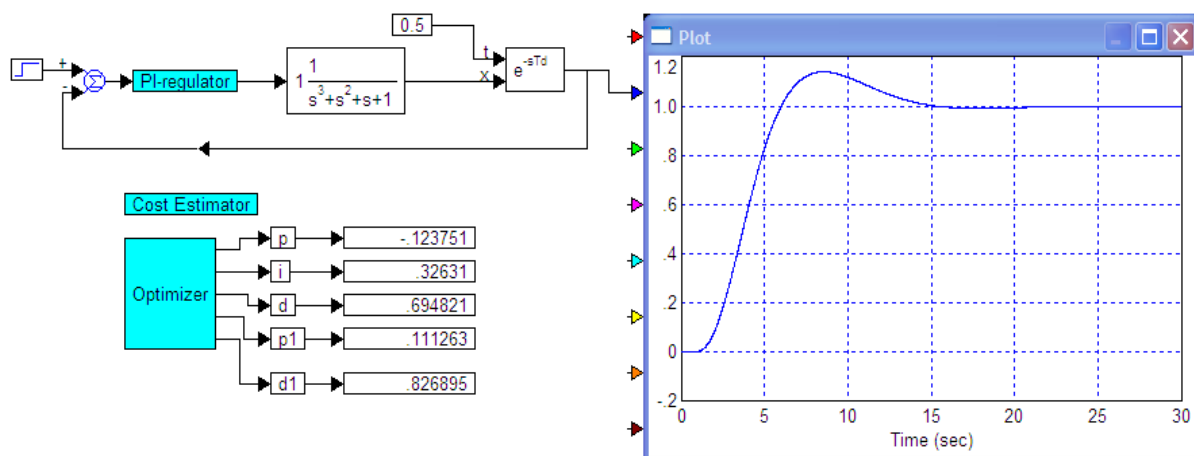
На Рис. 4 показан проект для моделирования в программе VisSim системы по структуре Рис. 3. В этой структуре используются три

составных блока: регулятор (*PI-regulator*), оптимизатор (*Optimizer*) и блок для оценки стоимостной функции (*Cost Estimator*). При моделировании использовались различные виды регуляторов, а не только ПИ-регулятор, но название блока сохранено, чтобы не переделывать весь проект, а вносить изменения только путем редактирования структуры блока.

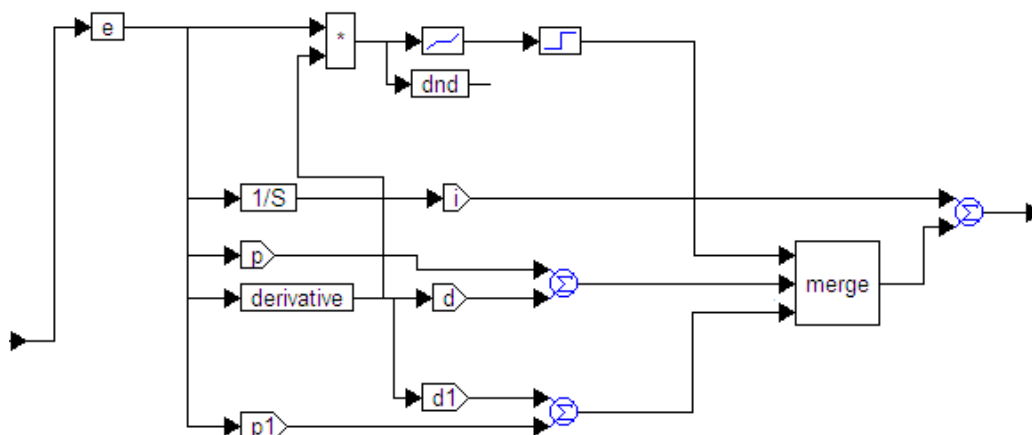
На *Рис. 5* показана внутренняя структура регулятора, на *Рис. 6* – внутренняя структура блока оценки стоимостной функции, а на *Рис. 7* – структура оптимизатора.

В блоке оценки целевой функции имеется вычислитель интеграла от модуля ошибки, умноженного на время. Также под интеграл введен с коэффициентом, равным десяти, выходной сигнал детектора неправильных движений. Этот сигнал обозначен переменной *dnd*. Как видно из *Рис. 5*, в этом детекторе ошибка управления, обозначенная переменной

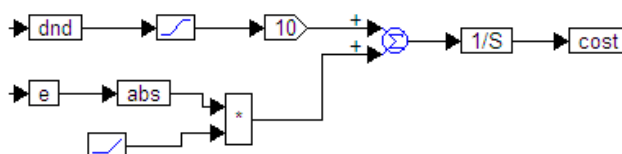
*e*, умножается на блоке умножения, обозначенного символом [\*], на производную от ошибки. Производная вычисляется блоком *derivative*. Произведение ошибки на ее производную с выхода блока умножения поступает на два последовательно соединенных нелинейных элемента: ограничитель и реле. Совместно они образуют требуемый нелинейный элемент, показанный на *Рис. 1*. Если ошибка возрастает по величине, то указанное произведение положительно, а если она убывает по величине, то это произведение отрицательно. Нелинейный элемент преобразует этот сигнал в дискретный сигнал с двумя выходными значениями. Этот сигнал поступает на вход блока *merge*, осуществляющего подключение одного из своих аналоговых входов к своему выходу, то есть реализующего функции коммутатора.



*Рис. 4.* Структура и переходные процессы



*Рис. 5.* Структура регулятора *PI-regulator* (здесь реализован ПИД-регулятор)



*Рис. 6.* Структура блока оценки стоимостной функции *Cost Estimator*

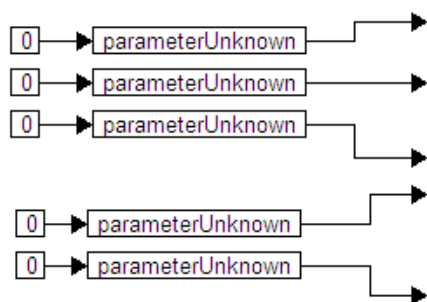


Рис. 7. Структура блока Optimizer

Расчет коэффициентов выполнен в режиме оптимизации, предусмотренном в программе VisSim [3–6].

Для сравнения использовался простой ПИД-регулятор. График, полученный с указанной системой, показан на Рис. 4 справа, а график, получаемый с простым ПИД-регулятором,

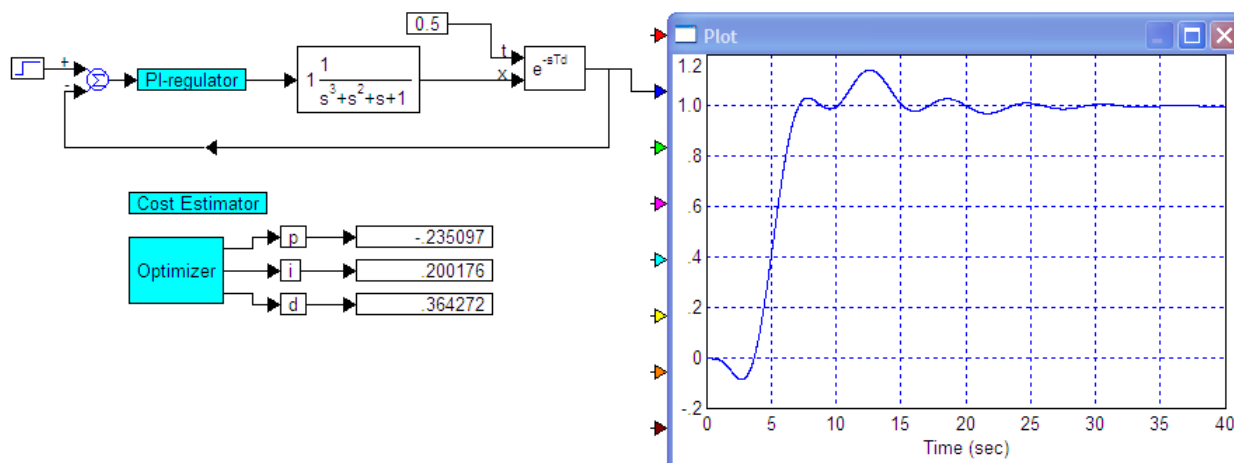


Рис. 8. Структура с простым ПИД-регулятором и переходные процессы

Также косвенным признаком эффективности предложенного метода служит тот факт, что процедура оптимизации дала существенно различные значения для коэффициентов ПИ-регулятора, они даже имеют разные знаки. Эти значения указаны в выходных дисплеях получаемых переменных. А именно: в случае применения простого ПИД-регулятора расчет дал следующие коэффициенты регулятора:  $K_{\text{П}} = -0,235$ ;  $K_{\text{И}} = 0,200$ ;  $K_{\text{Д}} = 0,364$  – соответственно коэффициенты пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего трактов. В случае применения системы по Рис. 4, получены коэффициенты для первого регулятора:  $K_{\text{П}} = -0,123$ ;  $K_{\text{Д}} = 0,695$ ; коэффициенты для второго регулятора:  $K_{\text{П}} = 0,111$ ;  $K_{\text{Д}} = 0,286$ ; коэффициенты для третьего регулятора  $K_{\text{И}} = 0,326$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема

представлен на Рис. 8 справа.

Видно, что качество управления на Рис. 4 лучше, чем качество управления на Рис. 8. Действительно, в первом случае процесс изначально монотонный, пока не пересекает уровень предписанного значения. Далее имеется перерегулирование на величину около 15 %, после чего процесс плавно (асимптотически) устремляется к предписанному значению практически без дополнительных колебаний. Во втором же случае процесс в начальном этапе идет в ошибочном направлении, но вверх, а вниз. После достижения предписанного значения он достигает небольшого перерегулирования, но затем вновь отклоняется, и перерегулирование достигает тех же 15 %. Имеются колебания, как минимум, с четырьмя отчетливо различимыми максимумами.

проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В.А., Ядрышников О.Д. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). Стр. 24–29. URL: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-4.pdf>
- [2] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Повышение качества переходного процесса при управлении склонными к колебаниям объектами. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 3 (5). С. 12–17. рис. 4, URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AIPI-3-2013-2.pdf>
- [3] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. 335 с.
- [4] Жмудь В.А. Динамика мехатронных систем: учеб. пособие / В.А. Жмудь, Г.А. Французова, А.С.

Востриков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 176 с. ISBN 978-5-7782-2415-5.

- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.



**Вадим Аркадьевич Жмуд** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)



**Трубин Максим Витальевич** – студент кафедры Автоматики НГТУ.

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

## Regulator with Division of "Right" and "Wrong" Movements

V.A. ZHMUD, M.V. TRUBIN

*Abstract.* When controlling of objects prone to oscillations, regulator tuning is often quite complex. One of the most effective methods of finding the coefficients of the regulator for a given structure is method of numerical optimization. This method involves simulation of the system with the regulator, in which different coefficients are set. The software makes automatic search for the optimal values of coefficients that provide the minimum of the given cost function. This cost function usually includes integral of the modulus of the square of error during time, and may contain additional non-negative terms, used to provide the required properties of the system. Previously, we proposed to introduce a term, which increases in the presence of transient processes of areas where error increases in magnitude. This term is formed from the product of errors at its derivative, which is passed through a nonlinear element, which

transmits only the positive signal (i.e. it has lower limit of zero value). Such growth error detector may be used for separation of the transient to different parts, namely on the portions where the error not rises, and ones where it rises. This paper proposes for each of the two types of process using of the individually adjustable coefficients of the regulator. At least, it may be appropriate for derivative and (or) for the proportional control channel. The appropriateness of such a division for integrating channel is questionable. Therefore, the idea of the paper is to share the movement of the system to ones that go in the right direction and those that go in the wrong direction. It proposes to use two different regulators. Namely, for movements in the right direction the use of the regulator with one set of coefficients and for movements in the wrong direction the use of it with the different set of coefficients. We call correct movements such movements in which the error decreases, or remains constant, i.e., the product of an error on its time derivative is negative or zero. We call wrong movements other movements, when the product of error with its derivative is positive; hence, the error increases in magnitude. To distinguish types of motions we use the special detector of the "correctness" of the movement.

*Keywords:* control, automation, feedback, speed, accuracy, control, transient numerical optimization

## REFERENCES

- [1] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). Ctr. 24–29. URL: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-4.pdf>
- [2] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Povyshenie kachestva perehnogo processa pri upravlenii sklonnymi k kolebanijam ob#ektami. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2013. № 3 (5). S. 12–17. ris. 4, URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AIPI-3-2013-2.pdf>
- [3] V.A. Zhmud. Simulation study and optimization of closed systems of automatic control. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. 335 p.
- [4] V.A. Zhmud, G.A. Frantsuzova, A.S. Vostrikov. Dynamics of mechatronic systems: Proc. Manual. Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2014. - 176 p. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. Method of designing energy-efficient controllers for complex objects with partially unknown model. Proc. : The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30 - July 3, 2014, Samara. Russia. p. 557-567.