

Повышение точности управления объектом совмещением достоинств нескольких датчиков

В.А. Жмудь¹, О.Д. Ядрышников¹, В.М. Семибаламут²

¹ ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия, ² ФГБУН Геофизическая служба СО РАН

Аннотация: Прецизионная управление объектами в контуре с отрицательной обратной связью или стабилизация их выходных величин широко используется в науке и технике. Точность стабилизации или управления зависит не только от свойств регулятора, но и в первую очередь от точности датчика выходной величины. Зачастую выбор лучшего датчика невозможен, поскольку разные датчики могут обладать лучшими свойствами в различных частотных диапазонах, и ни один из датчиков не является лучшим по всем параметрам. Например, датчики, обладающие лучшим быстродействием, чаще всего характеризуются невысокой точностью, а наиболее точные датчики зачастую не обладают достаточным быстродействием. В работе исследуется метод совмещения достоинств различных датчиков. Исследование осуществляется моделированием в программе *VisSim*.

Ключевые слова: управление, обратная связь, автоматика, регулятор, качество управления, точность

ВВЕДЕНИЕ

Управление объектами в контуре с отрицательной обратной связью позволяет обеспечить высокую точность в присутствии возмущающих воздействий, поэтому широко используется. В системах стабилизации требуется, чтобы выходная величина объекта не изменялась во времени, несмотря на то, что на объект воздействует возмущение, стремящееся изменить эту величину. В таких системах ошибка управления или стабилизации $e(t)$, равная разности между предписанным выходным сигналом объекта $v(t)$ и его фактическим значением $y(t)$, преобразуется регулятором в управляющий сигнал $u(t)$, который прикладывается к входу объекта. Результатом действия этого сигнала является достижение требуемого равенства $y(t) \approx v(t)$, по крайней мере, в среднем (в ограниченной полосе частот). Если $v(t) = 0$, обратная связь предназначена для стабилизации выходной величины объекта с высокой точностью. К таким системам предъявляются особенно высокие требования по точности. В некоторых случаях предела требуемой точности назвать нельзя, то есть чем выше точность стабилизации, тем лучше.

Примером таких систем могут служить системы стабилизации частоты или фазы лазерного излучения для оптического стандарта частоты [1–3]. В работе [4] предложено использование двух датчиков для совмещения их достоинств и преодоления их недостатков. При этом важно так рассчитать регулятор, чтобы в действительности достоинства датчиков совмещались, а недостатки нивелировались. Принцип такого подхода состоит в том, чтобы использовать в различных диапазонах частот имен те датчики, точность которых в этих диапазонах выше. Также следует решить вопросы сопряжения этих областей и расчета регуляторов, обеспечения устойчивости и требуемого качества управления (стабилизации).

В данной статье исследуется предложенный метод путем математического моделирования и численной оптимизации регуляторов. Верификация метода осуществлена на примере.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется несколько датчиков выходной величины объекта. Для начала рассмотрим ситуацию с двумя датчиками. Предположим, отношение сигнал/шум у первого датчика выше в высокочастотной области, а у второго – в низкочастотной области. Ставится задача проектирования регулятора, который бы обеспечил управление объектом в соответствии с тем отношением сигнал/шум, которое соответствует лучшему из датчиков в данной частотной области.

Вариант включения датчиков, который может быть предложен на основании самых общих соображений, состоит в том, чтобы параллельно подключить все имеющиеся датчики к объекту для измерения его выходной величины. Далее следует использовать некоторые выравнивающие фильтры, которые бы обеспечили сочетание выходных сигналов этих датчиков с правильными весовыми коэффициентами. Соответствующая структурная схема показана на *Рис. 1*. Такая схема категорически не рекомендуется вследствие характерных недостатков. На этом *Рис. 1* имеются два датчика одной и той же величины $Y(t)$. Согласование передаточных функций таких датчиков является сложной задачей, решение которой при другом подходе даже не требуется. Поэтому схема по *Рис. 1* не рекомендуется к использованию, хотя она

достаточно наглядно демонстрирует принцип действия системы с двумя датчиками.

Рассмотрим схему по Рис. 2. Здесь большими буквами обозначены преобразования по Лапласу от функций времени, обозначенных малыми буквами. Например, $Y(s)$ – преобразование от

выходной величины $y(t)$, $N_k(s)$ – преобразование от шума k -го датчика $n_k(t)$, $Q_k(s)$ – выходной сигнал k -го датчика $q_k(t)$, $E_k(s)$ – преобразование от ошибки, вычисленной с помощью сигнала от k -го датчика $e_k(t)$, и так далее.

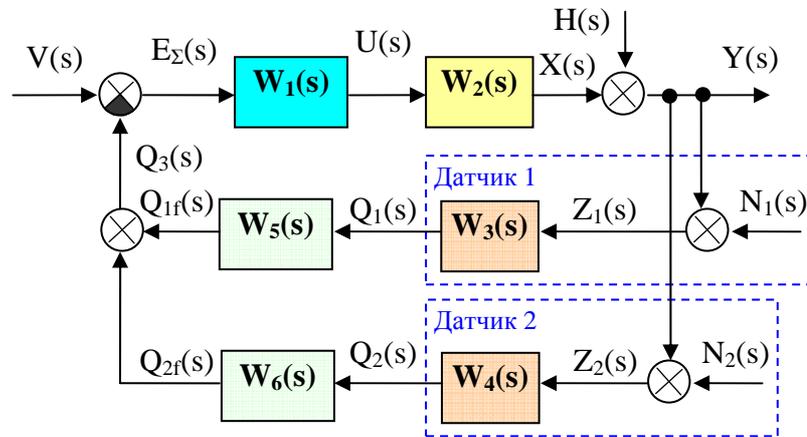


Рис. 1. Не рекомендуемая структурная схема системы с двумя датчиками

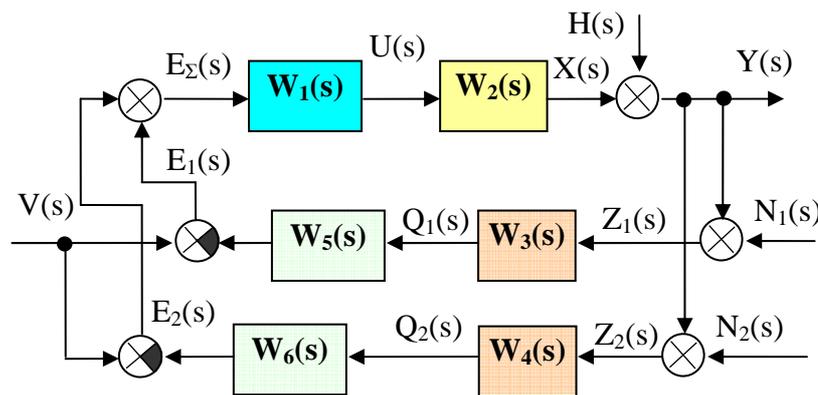


Рис. 2. Рекомендуемая структурная схема системы с двумя датчиками

В этой схеме по отдельности вычисляются ошибки величины $y(t)$ на основе выходных сигналов от двух датчиков: $q_1(t)$ и $q_2(t)$. Каждая из получаемых ошибок должна быть равна нулю. Если сигнал обратной связи, равный сумме этих ошибок, подается на объект с усилением через регулятор W_1 , то эта суммарная ошибка сводится к нулю. Для корректной работы этой схемы не требуется согласование масштабов передаточных функций W_3 и W_4 , а также не требуется, чтобы получаемые сигналы оценки выходной величины плавно дополняли друг в друга на промежуточном участке. В случае если оба датчика идеальны даже в отсутствие фильтров, то есть при $W_3 = W_4 = 1$, $N_1 = N_2 = 0$, получаем $e_Σ(t) = 2e(t)$. Это равносильно увеличению коэффициента регулятора вдвое. Если система остается устойчивой, она работает корректно, ошибка сводится к нулю. Поэтому выходной сигнал в рабочей области частот повторяет с требуемой точностью сигнал задания $y(t) \approx v(t)$.

Для удобства будем считать, что передаточные функции фильтров W_3 и W_4

дополняют передаточные функции датчиков до единицы в области рабочих частот. Объединим эти передаточные функции с передаточными функциями датчиков: $W_3(s) \cdot W_5(s) = W_7(s)$; $W_4(s) \cdot W_6(s) = W_8(s)$. Передаточную функцию последовательного регулятора, наоборот, разделим на две параллельные передаточные функции $W_9(s)$ и $W_{10}(s)$. Получим систему с двумя датчиками и двумя регуляторами, показанную на Рис. 3.

В этом случае постановка задачи состоит в следующем.

Задача 1. Даны две передаточные функции двух датчиков, отличающиеся так, что ни одна из них не может быть признана лучшей во всей рабочей полосе частот. Кроме того, каждый из датчиков подвержен влиянию шумов, характеристики которых различны и заданы изначально. Требуется рассчитать регулятор, который бы обеспечил наивысшую точность стабилизации выходной величины объекта.

Задача 2. Расширение задачи 1 для случая трех и более датчиков.

Примечание. Вследствие линейности системы и отсутствия каких-либо иных связей от сигнала задания $v(t)$ в контуры управления, кроме связи с вычитающими элементами, вычисляющими ошибку регулирования. Задача

стабилизации и задача управления решаются идентично, результат их решения достаточно показательно описывается откликом на ступенчатый скачок помехи $h(t)$ или на ступенчатый скачок задания $v(t)$.

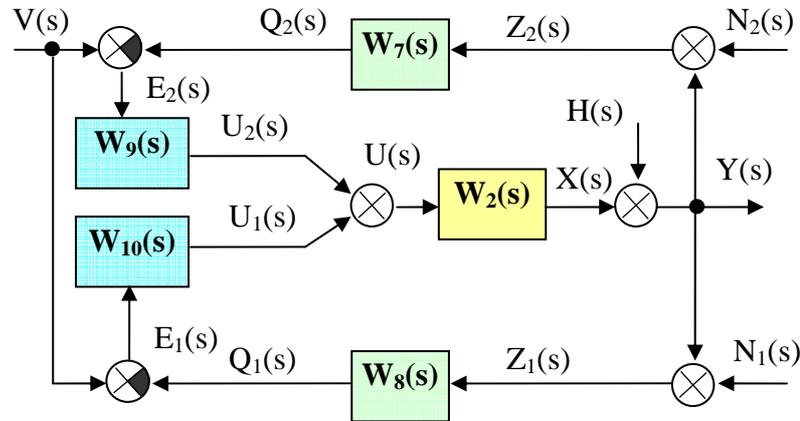


Рис. 3. Расчетная структурная схема системы с двумя датчиками

2. ПРИМЕРЫ МОДЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ

Рассмотрим три различных датчика. Их математические модели и соответствующие отклики на гармонический сигнал показаны на Рис. 4, где используется моделирование в программе VisSim.

Для простоты положим статический коэффициент у всех датчиков равным единице. Если это не так, то необходимо включить последовательно с датчиком соответствующий масштабный преобразователь или, если сигналы обрабатываются цифровым путем, использовать выравнивающий коэффициент.

Пусть передаточная функция первого датчика имеет вид апериодического звена первого порядка (фильтра первого порядка) с постоянной времени $T_1 = 0,5$ с. Также в модели этого датчика присутствует постоянное смещение выходного сигнала на величину 0,4, а также имеются аддитивные высокочастотные шумы (гауссов шум). Модель этого датчика показана на Рис. 4 в верхней цепи, подключенной к входу осциллографа с красным плоттером, соответствующий выходной сигнал при подаче на вход этого датчика гармонического сигнала показан красной линией на графике Рис. 4.

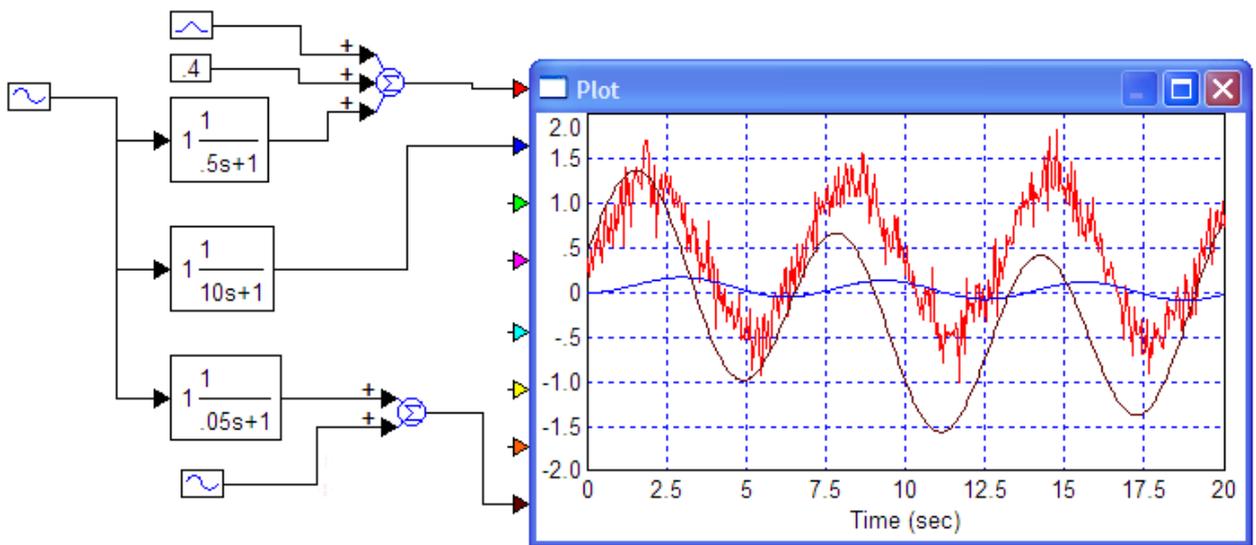


Рис. 4. Структурные схемы и отклики трех датчиков и результат моделирования в программе VisSim

Пусть передаточная функция второго датчика имеет вид апериодического звена с постоянной времени $T_2 = 10$ с. Соответствующая модель показана между выходом генератора и входом

синего плоттером осциллографа на Рис. 4, выходной сигнал показан синей линией.

Пусть модель третьего датчика описывается передаточной функцией с постоянной времени $T_3 = 0,05$ с. Также к выходному сигналу этого

датчика подмешивается медленно изменяющийся гармонический сигнал с периодом 100 с. Соответствующая модель показана между выходом генератора и входом черного плоттера осциллографа, график показан черной линией на *Рис. 4*.

3. РЕЗУЛЬТАТ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ДАТЧИКАМИ

В работе [4] предлагается выбирать для дифференцирующего контура датчики с лучшим быстродействием, а для интегрирующего контура датчики с более высокой статической точностью, что достаточно логично. Можно это утверждение расширить, указав, что для каждой области частот следует использовать тот датчик, который обладает лучшим отношением сигнал/шум в этой области.

В дополнение к теоретическим исследованиям можно использовать исследования на основе математического моделирования. Предлагаемая методика такого исследования состоит в следующем.

1. Выберем датчики с соответствующими моделями и на основе их сигналов организуем контур с отрицательной обратной связью, например, ПИД-регулятор, то есть регулятор, содержащий пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий каналы.

2. Коэффициент каждого канала может быть оптимизирован автоматически, если задать целевую функцию. Зададим, например, целевую функцию в виде интеграла от модуля ошибки, умноженного на время от начала переходного процесса, который инициируется единичным ступенчатым скачком.

3. Проведем такую процедуру для различных сочетаний использования датчиков.

4. Сравним результаты при использовании различных датчиков по переходным процессам и (или) по целевым функциям. Сделаем выводы.

Один из логичных вариантов выбора датчика состоит в выборе датчика № 2, с игнорированием возможности использования других датчиков. Основанием для такого выбора может служить тот факт, что данный датчик среди особенностей его модели содержит лишь фильтр первого порядка. В этом датчике отсутствуют какие-либо шумы или сдвиг нуля. Результаты оптимизации системы с таким датчиком показаны на *Рис. 5*. Перерегулирование достигает значения 5, то есть 400 %. Такую систему нельзя назвать приемлемой. При этом длительность переходного процесса составила около 10 с.

Рассмотрим результаты использования только третьего датчика, которые приведены на *Рис. 6*. Результаты использования только третьего датчика также не могут быть признаны приемлемыми, поскольку длительность переходного процесса превышает 100 с, перерегулирование составляет около 30 %.

Результаты использования только первого датчика не требуют моделировать и анализировать, поскольку очевидно, что в этом случае статическая ошибка составит 0,4 единицы (для ступенчатого единичного скачка это составит 40 %).

На основе предварительных рассмотрений о соотношении сигнал/шум по различным областям частот можно предложить следующий вариант использования: для пропорционального канала использовать первый датчик, для интегрального канала – второй датчик, для дифференцирующего канала – третий датчик. Такая структура и результаты ее оптимизации показаны на *Рис. 7*.

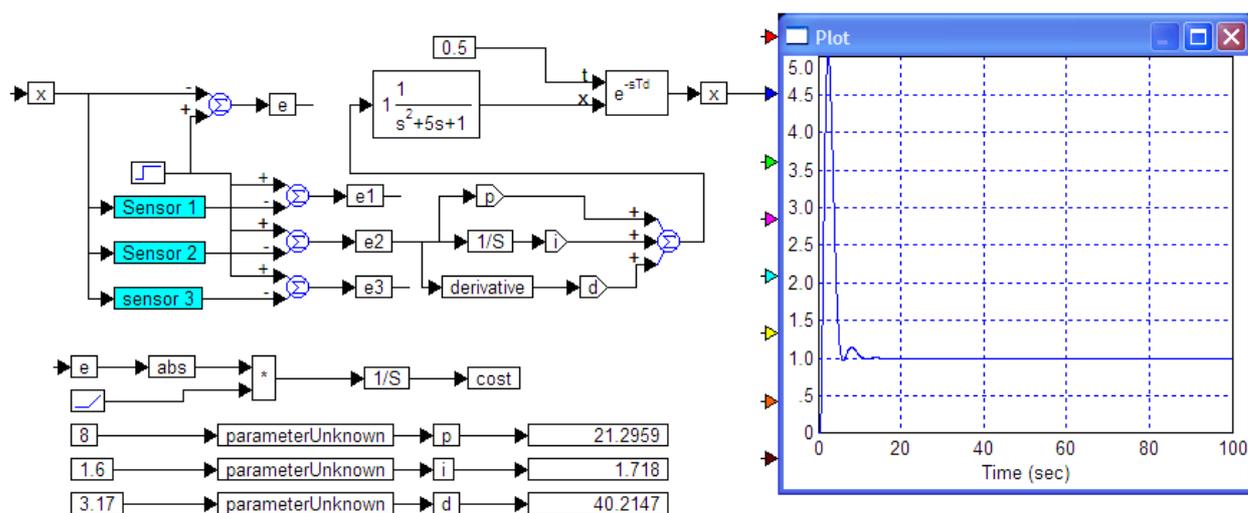


Рис. 5. Результаты оптимизации системы с использованием только второго датчика

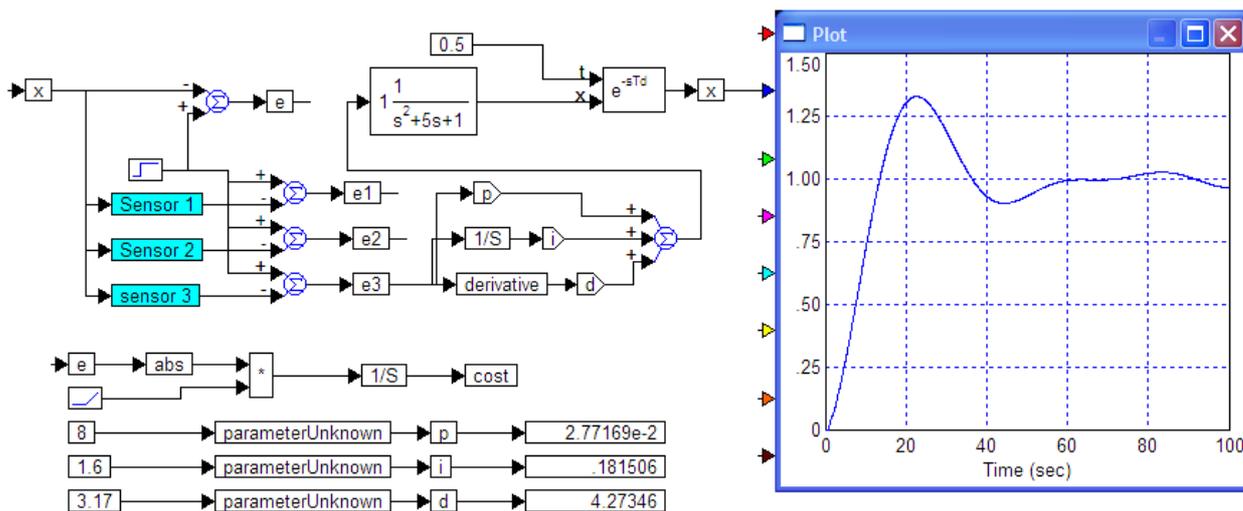


Рис. 6. Результаты оптимизации системы с использованием только второго датчика

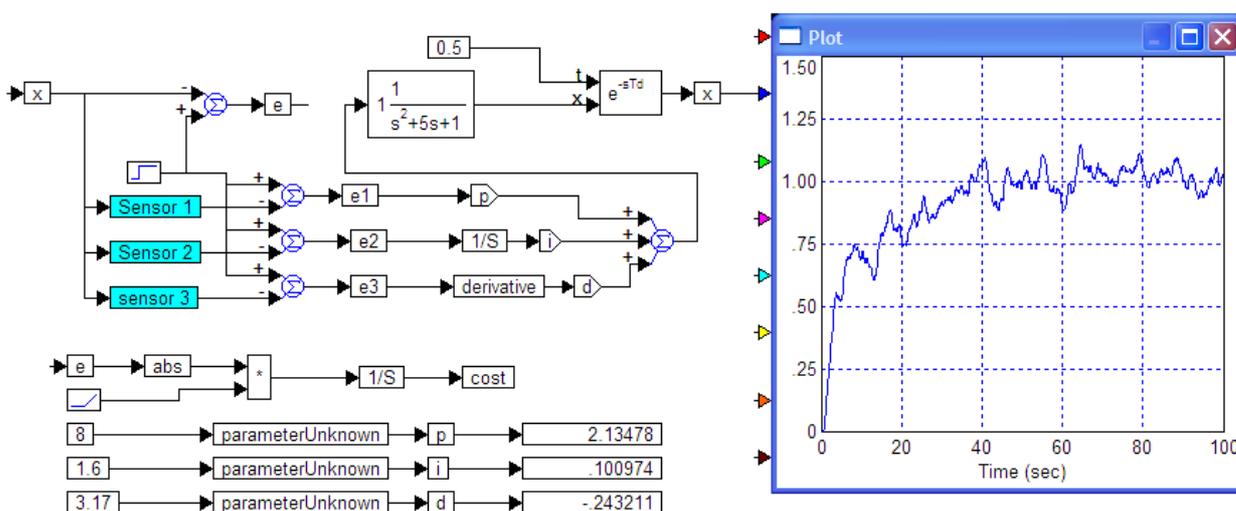


Рис. 7. Результаты оптимизации системы с использованием трех датчиков

Результаты оптимизации, показанные на Рис. 7, хотя и лучше других результатов по некоторым параметрам, все же не удовлетворительны.

Действительно, перерегулирование снизилось до величины не более 10 %, переходный процесс в целом заканчивается по истечении 40 с, но результат управления характеризуется недопустимо большим уровнем шумов, в именно: пиковые отклонения выходной величины от предписанного значения достигают 10 %. Фактически можно утверждать, что переходный процесс не заканчивается, поскольку система вынуждена обрабатывать (повторять) шум датчика.

Результат использования только двух датчиков показан на Рис. 8. При этом второй датчик используется и для пропорционального, и для интегрирующего каналов, а третий датчик используется для дифференцирующего канала. Первый датчик не используется.

Полученный результат, как видно из Рис. 8, является, безусловно, наилучшим из всех возможных результатов. Действительно,

переходный процесс фактически заканчивается через 20 с после его начала. Перерегулирование пренебрежимо мало (около 1 %), шумы в выходном сигнале отсутствуют.

Таким образом, численная оптимизация регулятора позволила на основе формальной процедуры исключить лишний датчик из структуры (что привело к упрощению), использовать оставшиеся датчики в наилучшем сочетании и с наилучшим выбором коэффициентов регулятора (за счет оптимизации).

Проделанное исследование продемонстрировало следующее:

1. Использование нескольких датчиков одной и той же величины при условии, что они характеризуются различными свойствами (по быстродействию и (или) по уровню шумов) позволяет достигать наилучшего качества управления, результат такого расчета эффективно может быть сделан автоматически в случае использования численной оптимизации регулятора.

2. Далеко не каждый датчик, который на основании общих соображений может казаться

полезным, является полезным в действительности. Процедура численной

оптимизации показала, что от использования некоторых датчиков целесообразно отказаться.

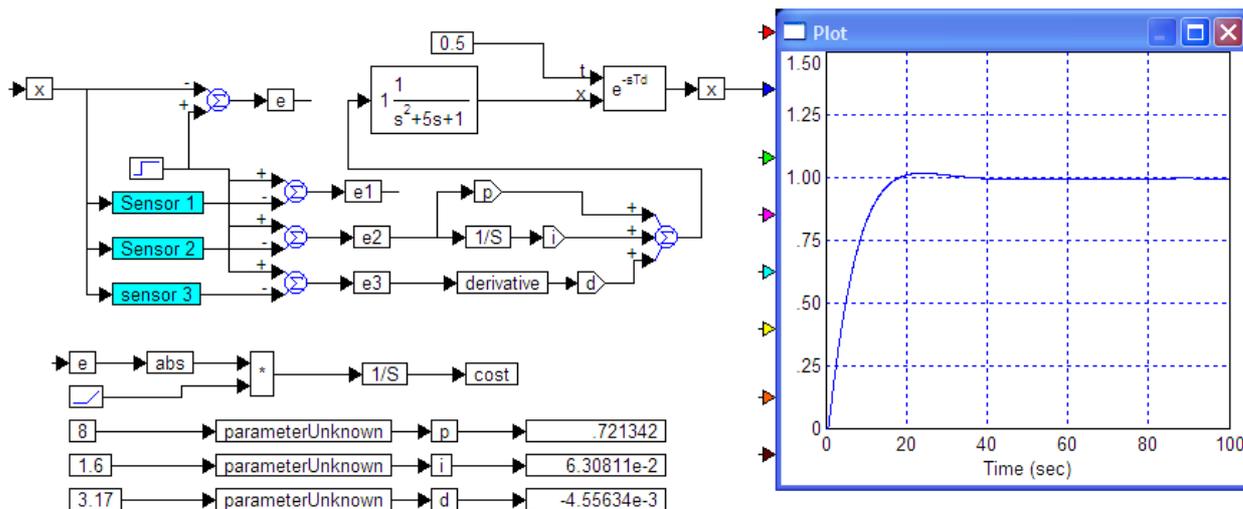


Рис. 8. Результаты оптимизации системы с использованием второго и третьего датчиков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован метод расчета двухканального регулятора одной выходной величины, основанный на численной оптимизации с использованием нескольких датчиков выходной величины. Выявлена и подтверждена моделированием целесообразность, возможность и эффективность использования более чем одного датчика. Также моделированием выявлена целесообразность отказа от использования некоторых датчиков. Эта целесообразность далеко не очевидна из общих соображений.

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».

ЛИТЕРАТУРА

[1] A phase-locked loop system for the difference frequency of two lasers. Barmasov S.V., Zhmud' V.A. Instruments and Experimental Techniques. 2000. T. 43. № 3. P. 381-383.

[2] Электронная система стабилизации частоты He-Ne лазера по линиям поглощения метана. Жмудь В.А., Бармасов С.В., Гительсон В.Д. Приборы и техника эксперимента. 1999. № 4. С. 127 (An electronic system for stabilizing of the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. Zhmud V.A., Barmasov S.V., Gitel'son V.D. Instruments and Experimental Techniques. 1999. T. 42. № 4. P. 551-557).

[3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational

Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.

[4] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.

[5] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.

[6] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.

[7] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.

[8] V. Zhmud, O. 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/>

[9] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. 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), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.



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



Олег Дмитриевич Ядрышников – аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор более 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.
E-mail: oleg_yadr@mail.ru



Владим Михайлович Семибаламут – директор ФГБУН «Геофизическая служба СО РАН». Область научных интересов и компетенций: автоматизация научного эксперимента, лазерная физика, геофизика, программное обеспечение, оптимизация.
E-mail: wladim28@yandex.ru

REFERENCES

- [1] A phase-locked loop system for the difference frequency of two lasers. Barmasov S.V., Zhmud V.A. Instruments and Experimental Techniques. 2000. T. 43. № 3. P. 381-383.
- [2] An electronic system for stabilizing of the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. Zhmud V.A., Barmasov S.V., Gitel'son V.D. Instruments and Experimental Techniques. 1999. T. 42. № 4. P. 551-557.
- [3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [4] V.A. Zhmud. Simulation, research and optimization of locked system of automatic control. Monograph. Novosibirsk. Publishing house of NSTU. 2012. – 335 p.
- [5] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [6] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [7] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [8] V. Zhmud, O. 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/>
- [9] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. 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), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.

Increasing of the Accuracy of Object Controlling by Combining the Advantages of Several Sensors

V.A. ZHMUD, O.D. YADRISHNIKOV, V.M. SEMIBALAMUT

Abstract. Precise control of objects in the loop with negative feedback or stabilization of their output values are widely used in science and technology. Stabilization accuracy or control depends not only on the properties of the controller, but primarily on the accuracy of the sensor of output value. Often the choice of the best sensor is impossible because the different sensors may have better properties in different frequency ranges, and none of the sensors is the best in all respects. For example, sensors, offering the best performance, often characterized by low accuracy and the most accurate sensors are often not fast enough. In this paper the method of combining the advantages of different sensors is researched. The study is carried out with the simulation program VisSim.

Key words: Control, feedback, automation, regulator, quality control, precision