

Управление объектом в контуре с обратной связью при использовании неидеальных датчиков положения и ускорения

*В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, О.Д. Ядрышников, В.Г. Трубин
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия
ФГБУН «Геофизическая служба СО РАН»*

Аннотация: Рассматривается задача управления балансирующим роботом в контуре с отрицательной обратной связью. Регулятор может быть рассчитан методом численной оптимизации. Датчики контролируемой величины несовершенны. Датчик угла ориентации (гироскоп) обладает ограниченным быстродействием, а также бинарным шумом квантования. Датчик ускорения (акселерометр) обладает дрейфом среднего значения, а также гауссовым шумом. Ни один из этих датчиков не достаточен для эффективной стабилизации балансирующего робота, но использование их обоих в единственной петле управления позволяет достичь требуемой точности управления, статической и динамической. Методика совместного использования двух датчиков для более точного определения единственной величины, разработанная ранее теоретически, апробирована моделированием. Кроме того, результаты подтверждаются практическим их использованием с положительным эффектом.

Ключевые слова: автоматика, управление, переходный процесс, устойчивость, качество управления, замкнутая система, точность, датчики, балансирующий робот, гироскоп, акселерометр

ВВЕДЕНИЕ

Разработка роботов, работающих в реальном времени, целесообразно не только с научно-исследовательскими целями, но также и для целей обучения студентов. Основные проблемы проектирования и отладки при этом отрабатываются самими студентами под руководством преподавателей на малоразмерных и маломощных моделях. Достоинства такой разработки состоят в том, что каждый элемент таких роботов может быть исследован и модифицирован до мельчайших подробностей самостоятельно, технология остается в распоряжении разработчика, поэтому вся разработка может быть повторена, в том числе в увеличенных размерах и (или) в более мощной версии изделия. Действительно, основные проблемы организации такой системы не зависят от размеров, тогда как отладка малогабаритного изделия безопасна, более дешева и в некоторых

случаях даже более сложна, что в данном случае является достоинством, поскольку при обучении на более сложном оборудовании обучающийся получает более высокую квалификацию. Более высокая сложность состоит, прежде всего в большем быстродействии маломощного робота (что требует большего быстродействия управляющей электронной части), а также в необходимости максимального стремиться к уменьшению веса и снижению габаритов всех компонент системы.

Сложные задачи проектирования, компоновки элементов, согласования их по электрическим сигналам, идентификации объекта и настройки регуляторов могут быть отработаны на дешевых моделях и наглядно продемонстрированы студентам. Кроме того, при решении задач управления могут возникать новые (научные) проблемы, которые не столь остры при управлении объектом больших габаритов и большей инерционности.

Примером такого малогабаритного робота может служить двухколесный балансирующий робот, поддерживающий равновесие при действии неконтролируемых внешних помех.

Одна из острейших проблем отладки такого робота – это обеспечение требуемой точности управления в реальном времени. Эта задача решается применением систем с обратной связью, основными элементами которой являются объект, датчик его выходной величины и регулятор. Эти три элемента включены последовательно в управляющий контур (то есть в петлю).

Объектом управления в этом случае является электромеханическая часть, включающая электропривод, приводящий в действие колеса, и механическая часть робота. Центр его масс следует поддерживать в равновесии. Особенностью объекта является тот факт, что центр масс расположен намного выше оси вращения колес, поэтому робот без действия обратной связи неустойчив и может сохранять равновесие только в случае эффективной работы обратной связи.

Типовая структура любой **электромеханической** системы с отрицательной обратной связью показана на *Рис. 1*.

Типичная модель системы задается системой уравнений в области преобразований Лапласа. Модель объекта задается следующим уравнением:

$$X(s) = W(s)U(s) + H(s). \quad (1)$$

Здесь каждая функция от аргумента s , кроме $W(s)$ – это преобразование по Лапласу от соответствующей функции времени, $X(s)$ соответствует выходной величине $x(t)$, $U(s)$

соответствует управляющему сигналу $u(t)$, поступающему на вход объекта, $H(s)$ – неизвестному возмущению $h(t)$, которое система должна подавить за счет действия обратной связи, $W(s)$ – передаточная функция объекта.

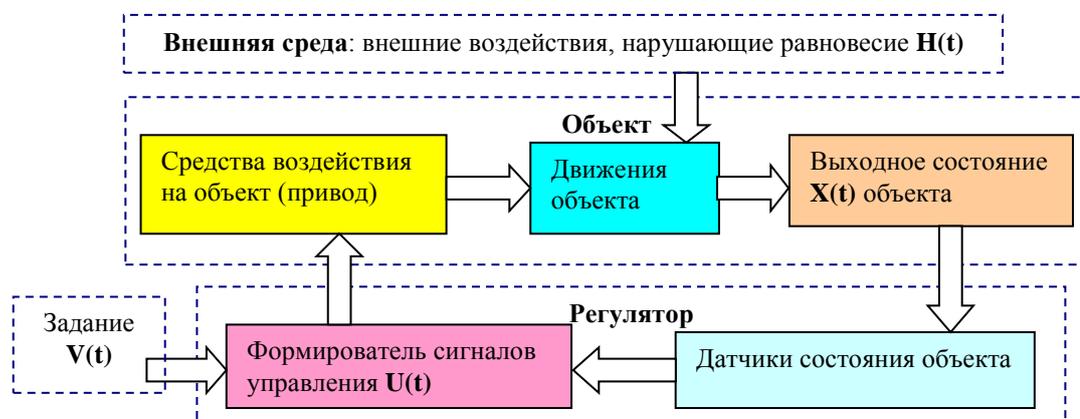


Рис. 1. Типичная структура с обратной связью в автоматических устройствах

Модель действия регулятора задается следующим уравнением:

$$U(s) = W_R(s)E(s). \quad (2)$$

Здесь $W_R(s)$ – передаточная функция регулятора, $E(s)$ – преобразование по Лапласу от ошибки управления $e(t)$. В системах стабилизации, как правило, ошибка приравнивается к выходной величине $x(t)$ с отрицательным знаком, поскольку требуется, чтобы выходная величина (отклонение от равновесного состояния) была равна нулю. В системах управления (регулирования) имеется предписанное значение (задание) $v(t)$, которое прибавляется к выходной величине через сумматор, а уравнение сумматора имеет вид:

$$E(s) = V(s) - X(s) \Leftrightarrow e(t) = v(t) - x(t). \quad (3)$$

Динамическая и статическая ошибка системы при обработке изменений задания идентична ошибке при идентичных изменениях помехи, поэтому, как правило, качество и точность системы исследуется именно по ошибке обработки задания. Чаще всего считают, что выходная величина доступна для измерения. На практике это всегда не так. Поэтому для реализации системы используется датчик выходной величины с соответствующей передаточной функцией $W_c(s)$, а соотношение (3) в этом случае принимает вид:

$$E(s) = V(s) - W_c(s)X(s). \quad (4)$$

Задача проектирования системы усложняется, если невозможно выбрать датчик, который позволяет обеспечить требуемую статическую и динамическую точность. В этом случае приходится применять два или более датчиков. Например, для обеспечения статической точности

используется датчик с малой статической погрешностью (но недостаточной динамической точностью), а для обеспечения динамической точности используется другой датчик, с высокой динамической точностью, то есть с широкой полосой пропускания и малыми шумами в области этой полосы, хотя, возможно, при этом и с недостаточной статической точностью. Задача использования двух или более датчиков для управления единственной величиной рассмотрена в работе [1]. В данной статье исследуются особенности практических проблем при решении задач этого класса, которые состоят в том, что даже при идеальных датчиках управление системы представляет собой не простую задачу. В этих условиях отличие датчиков от идеала крайне затрудняет проектирование системы.

Подобные проблемы невозможности использования одного датчика и необходимости совмещения положительных свойств нескольких датчиков возникают также во многих других задачах управления в контуре с отрицательной обратной связью. Особенно трудно их решить в том случае, когда даже при использовании идеального датчика управление объектом не является простой задачей вследствие специфических свойств его математической модели. Одним из таких свойств является склонность к колебаниям. Эта склонность может зачастую привести к тому, что в системе имеет место чрезвычайно большое перерегулирование, или даже обратное перерегулирование, то есть движение в ошибочном направлении на первоначальной стадии переходного процесса. Методы проектирования регулятора исследуются моделированием.

1. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

Модель объекта не линейна, но вблизи

равновесного состояния ее можно считать линейной. Передаточная функция объекта содержит запаздывание и фильтр второго порядка. Совместные свойства этого фильтра и запаздывания приводят к тому, что объект обладает склонностью к колебаниям.

Пусть, например, модель объекта определена в следующем виде:

$$X(s) = \frac{\exp(-0.2s)}{s^3 + s^2 + s + 1} U(s) \quad (5)$$

Здесь использован масштаб времени 1:10, то есть время дано в десятых долях секунды.

Воспользуемся методом численной

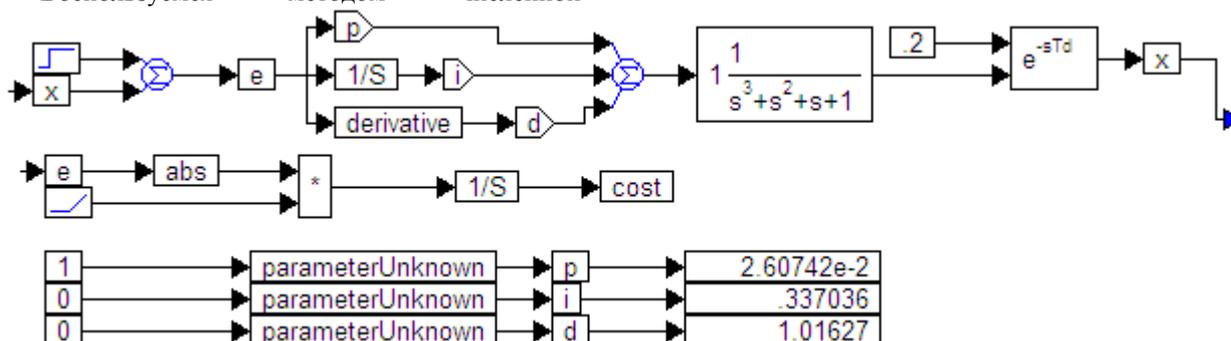


Рис. 1. Структурная схема для моделирования и оптимизации регулятора в системе с объектом (5)

Этот объект обладает параметрами на грани между простыми и сложными, оптимизация регулятора для него дает положительный результат, но в системе имеет место значительное перерегулирование. При этом используется целевая функция для оптимизации вида:

$$\Psi = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (7)$$

Здесь T – время моделирования переходного процесса, t – время (как аргумент при моделировании), $e(t)$ – ошибка управления как функция времени. На Рис. 1 шины с одинаковыми наименованиями соединены (таковы особенности программы VisSim). Блоки “parameterUnknown” и “cost” обеспечивают оптимизацию коэффициентов регулятора. Полученные в итоге оптимизации коэффициенты равны, соответственно: $K_P = 0,02607$, $K_I = 0,337$ и $K_D = 1,016$. Полученный переходный процесс показан на Рис. 2.

Видно, что статическая ошибка в системе равна нулю, поскольку выходная величина стремится к заданию, равному единице. Но качество системы не слишком высокое, так как перерегулирование составляет около 17%, а также в процессе имеется больше пяти колебаний.

оптимизации для проектирования ПИД-регулятора в предположении идеального датчика выходной величины, то есть в предположении $W_S(s) = 1$. Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_R(s) = K_P + K_I / s + sK_D \quad (6)$$

Здесь коэффициенты K_P , K_I и K_D требуется определить в процедуре численной оптимизации. На Рис. 1 показана структура для моделирования и численной оптимизации регулятора в программе VisSim.

Чтобы убедиться, что объект представляет большую сложность, увеличим время запаздывания в пять раз. Результат моделирования показан на Рис. 3. Видно, что в результате два коэффициента регулятора становятся отрицательными, и только коэффициент интегрального канала остается положительным. Полученные коэффициенты равны соответственно: $K_P = -0,253$, $K_I = 0,1541$ и $K_D = -0,127$. На переходном процессе в этой системе, показанной на Рис. 4, в начале процесса имеет место обратное перерегулирование на величину около -17%.

Таким образом, видно, что управление объектом требует тщательной настройки регулятора, поскольку при небольших изменениях параметров модели даже при оптимальном регуляторе система склонна к обратному перерегулированию, что характерно для системы, находящейся вблизи границы устойчивости. Если в такой системе регулятор рассчитан недостаточно правильно, она потеряет устойчивость. Также об этом свидетельствуют отрицательные коэффициенты пропорционального и дифференцирующего каналов регулятора.

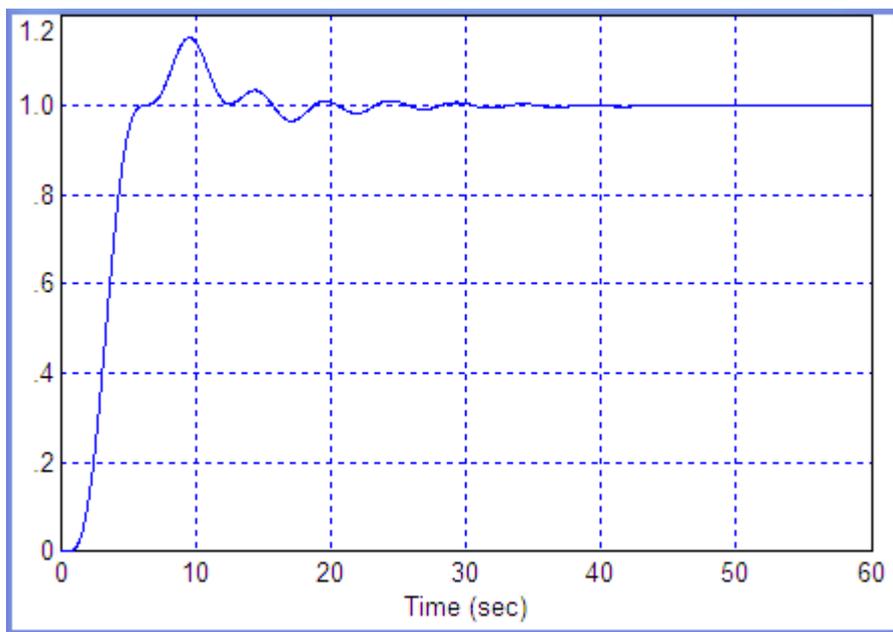


Рис. 2. Переходный процесс, получаемый в системе по Рис. 1

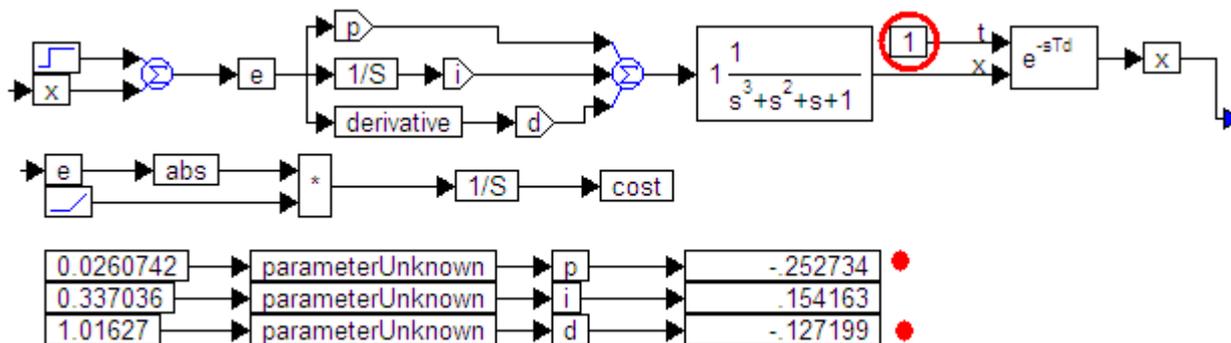


Рис. 3. Результат моделирования после увеличения запаздывания до величины 1 с: получены два отрицательных коэффициента (отмечены красными точками)

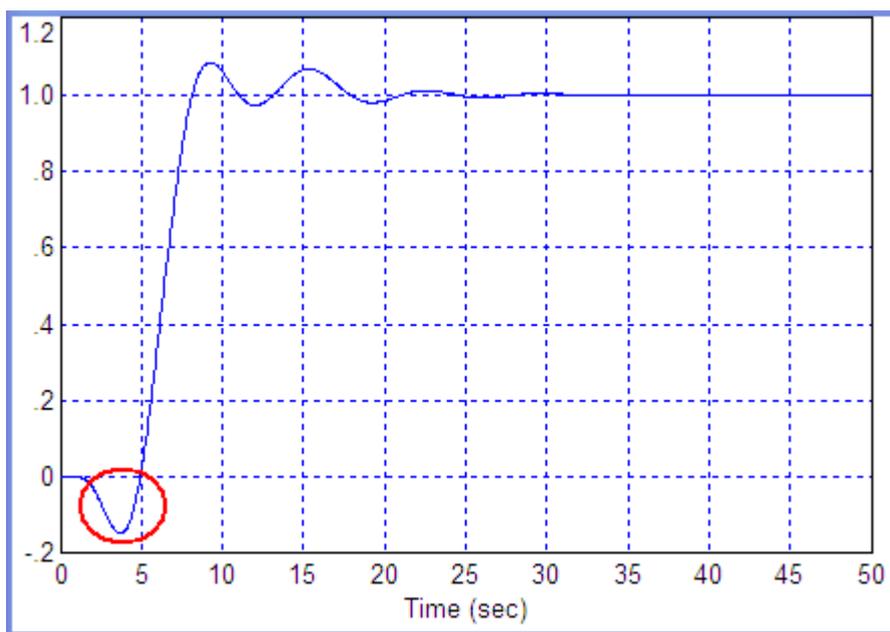


Рис. 4. Переходный процесс в системе по Рис. 3 приобретает обратное перерегулирование (отмечено красным эллипсом)

2. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ

Для определения угла отклонения балансирующего робота от вертикальной линии могут использоваться различные по природе датчики, но все они далеки от идеала.

Так, например, для определения угла отклонения может использоваться гироскоп. Однако его быстродействие ограничено, кроме того, он обладает шумом квантования. На *Рис. 5* показан характерный вид сигнала на выходе с гироскопа (синяя линия), когда на его входе сигнал имеет вид черной линией. Модель

гироскопа может в этом случае быть представлена передаточной функцией в виде фильтра с постоянной времени $0,1\text{ с}$ (то есть 1 единица в выбранном масштабе времени) с добавлением источника бинарного шума. При этом заданы следующие параметры генератора бинарного шума: длина регистра равна 6, амплитуда равна $0,01$, период обновления равен $0,5$. В данном случае шумы гироскопа заведомо несколько преувеличены для повышения уверенности в работоспособности системы в реальной ситуации.

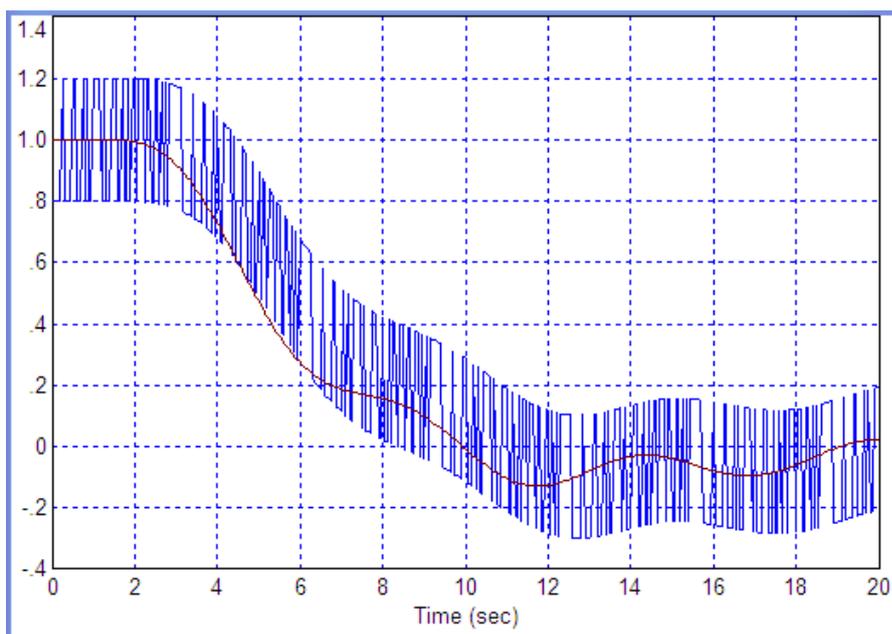


Рис. 5. Выход сигнала гироскопа (модель)

Как мы видели из предыдущего раздела, требования к датчикам чрезвычайно высоки. Если использовать гироскоп для управления, в сигнале производной присутствуют чрезмерно большие шумы. Это приводит к заметным колебаниям в установившемся состоянии, величина которых составляет около 5%. Поэтому для дифференцирующего канала целесообразно использовать акселерометр, который доступен в виде специализированной микросхемы. В модели акселерометра следует предусмотреть два отличия от идеального датчика: высокочастотный гауссов шум и низкочастотный дрейф. Высокочастотный шум несущественно сказывается вследствие его высокой частоты и малой величины, этот шум не дает смещения нуля. Низкочастотный дрейф дает смещение нуля, но оно не должно проявляться при использовании сигнала с выхода этого датчика для формирования сигнала ошибки в дифференцирующем тракте. Однако этот сигнал нельзя использовать для формирования сигналов в других трактах регулятора, особенно, в интегрирующем тракте, поскольку дрейф нуля слишком велик, и его

интегрирование привело бы к возникновению линейно нарастающей ошибки.

Для моделирования дрейфа акселерометра можно использовать сигнал с выхода низкочастотного генератора с малой амплитудой. На *Рис. 6* показан выходной сигнал акселерометра (синяя линия) в сравнении с фактическим сигналом производной выходного сигнала робота (красная линия). Параметры генератора, имитирующего дрейф акселерометра таковы: частота равна $0,0314$ (то есть половина периода этого сигнала равна 100 единиц), амплитуда равна $0,1$. Можно было бы предложить низкочастотный фильтр для устранения дрейфа, например, такой фильтр, как показан на *Рис. 7*. Однако такой фильтр хотя и удаляет эффективно низкочастотный дрейф, искажает также и высокочастотный сигнал, вводя как бы дополнительное дифференцирование. Для наглядности на *Рис. 8* показан сигнал на выходе этого фильтра (синяя линия) в сравнении с истинным сигналом производной (красная линия). На этом основании предлагается отказаться от применения фильтра и подавать сигнал с выхода акселерометра

непосредственно в дифференцирующий канал ПИД-регулятора. Также предлагается в этом тракте не использовать сигнала задания, то есть

сигнал обратной связи по скорости будет поступать на объект, минуя сумматор.

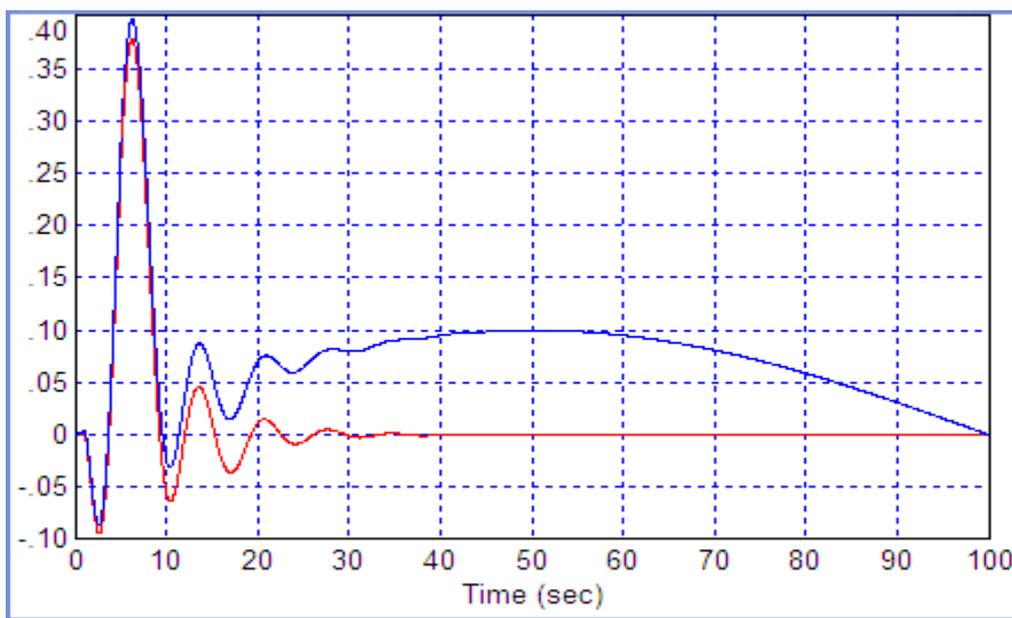


Рис. 6. Выход датчика акселерометра (модель) с помехой (синяя линия) и истинная скорость объекта (красная линия)



Рис. 7. Без окна настройки

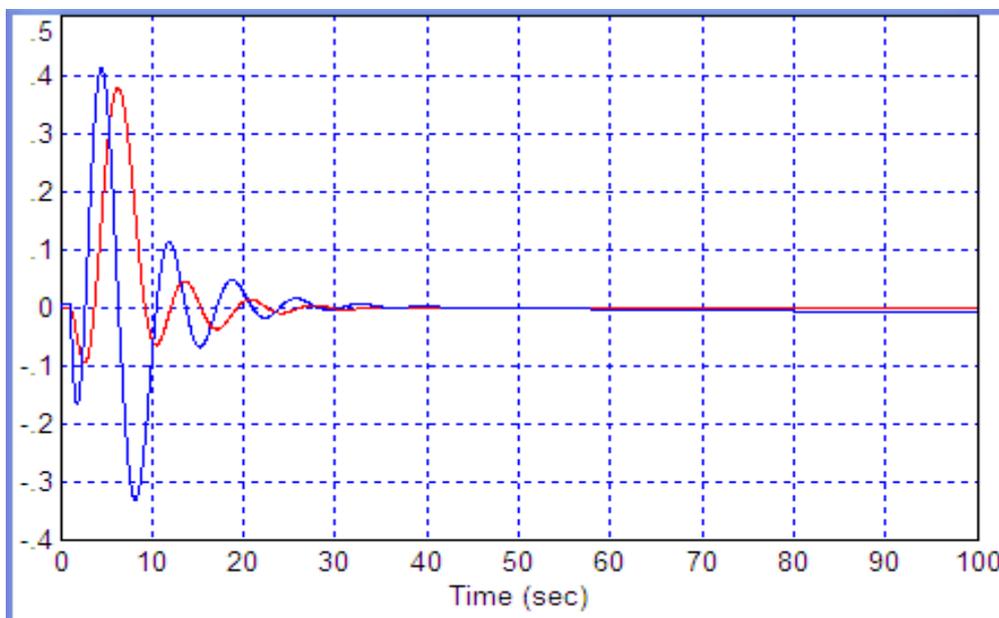


Рис. 8. Выход фильтрованного сигнала от акселерометра (синяя линия) и истинное ускорение объекта (красная линия)

3. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенность предлагаемого решения состоит в том, чтобы использовать не те результаты настройки регулятора, которые получены при моделировании системы с идеальным датчиком,

согласно Рис. 1, а осуществить оптимизацию в системе, где учтены все особенности моделей обоих датчиков. В соответствии с рекомендациями, данными в работе [2], при оптимизации используем увеличенное запаздывание в модели объекта, чтобы получить робастную систему. Такая система будет обладать

достаточно большим запасом устойчивости, и даже если некоторые коэффициенты модели объекта или регулятора будут отличаться от расчетных, система останется устойчивой.

На *Рис. 9* показана соответствующая структура для моделирования и оптимизации, а

также результаты оптимизации. При этом в результате также получено два отрицательных коэффициента, а именно: $K_P = -0,04766$, $K_I = 0,173667$ и $K_D = -0,418727$. Полученный переходный процесс показан на *Рис. 10*.

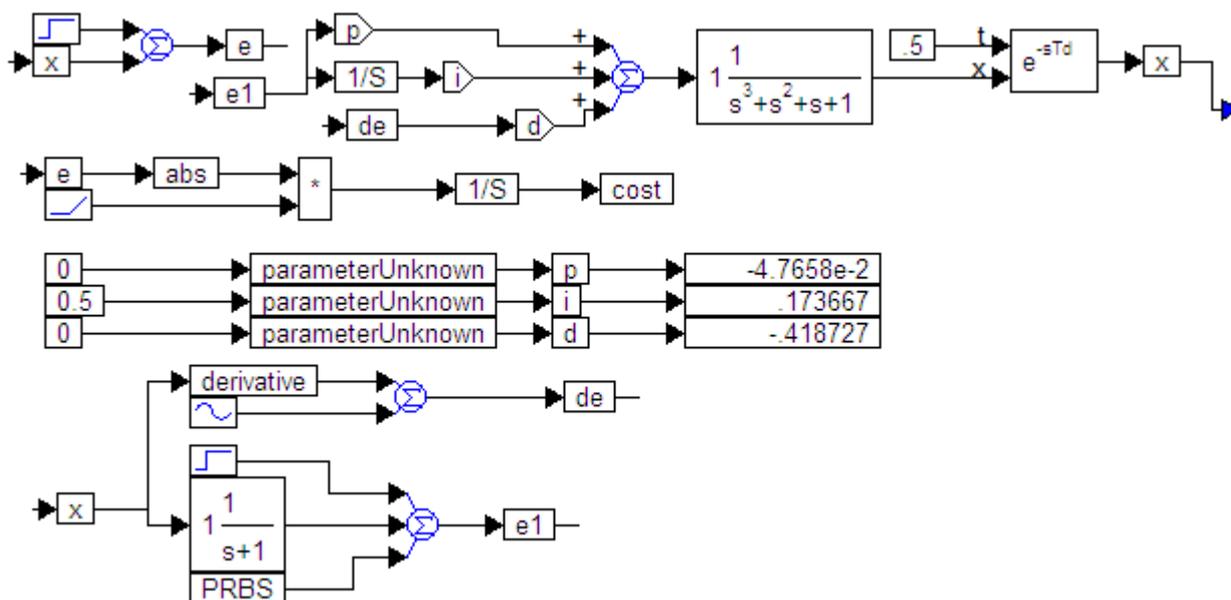


Рис. 9. Структурная схема для оптимизации регулятора с реальными моделями датчиков

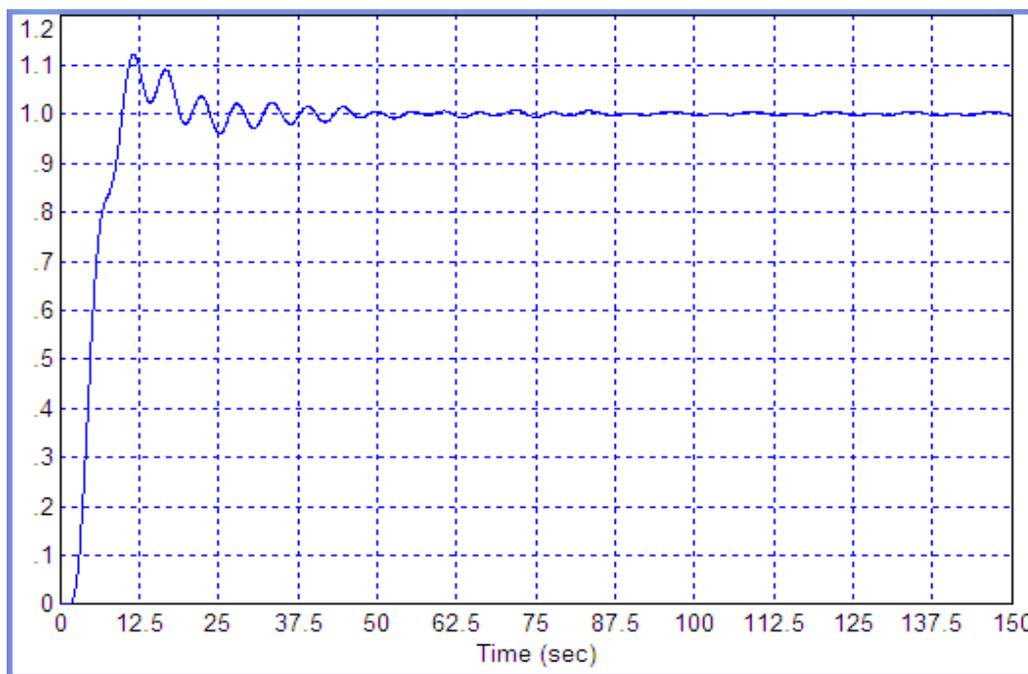


Рис. 10. Переходный процесс в системе по структуре, показанной на *Рис. 9*

Продемонстрируем робастность полученной системы. Для начала увеличим амплитуду обоих видов шумов датчика в 10 раз. Результат работы такой системы показан в виде переходного процесса на *Рис. 11* (синяя линия), для сравнения там же красной линией показан график с исходным процессом, соответствующий *Рис. 10*.

Видим, что в системе возникают колебания, амплитуда которых составляет около 6 %, но система остается устойчивой. Перерегулирование в системе не возрастает.

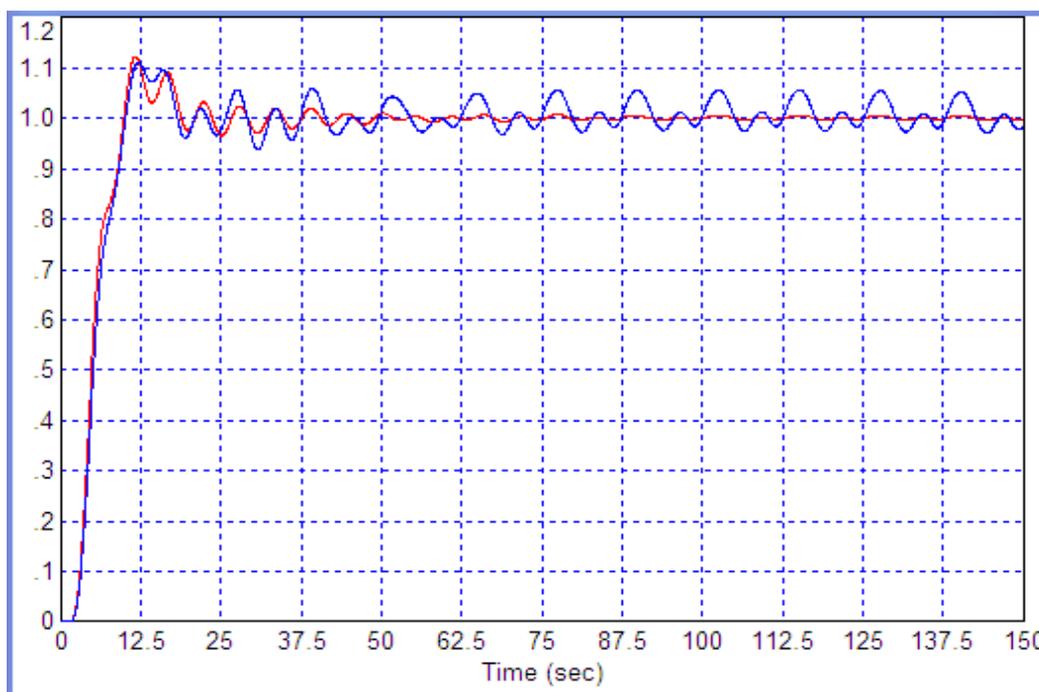


Рис. 11. Переходный процесс в случае, когда оба вида шумов увеличены по амплитуде в 10 раз (синяя линия), красной линией показан исходный график

4. ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ПРИ УХУДШЕНИИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТА И ДАТЧИКА

Вернем исходные значения шумов и увеличим постоянную времени фильтра в модели гироскопа в 10 раз, а также увеличим в 2,5 раза (до значения 5) запаздывание в модели объекта. Осуществим повторную оптимизацию регулятора. Получим значения его коэффициентов $K_p = -0,121$, $K_I = 0,05$

и $K_D = -0,315$. Результат работы такой системы показан в виде переходного процесса на Рис. 12. Видим, что в системе увеличиваются колебания, амплитуда которых сначала составляет около 5%, но постепенно затухает до пренебрежимо малой величины около 1%, система остается устойчивой. Перерегулирование в системе также не возрастает, хотя длительность переходного процесса увеличивается.

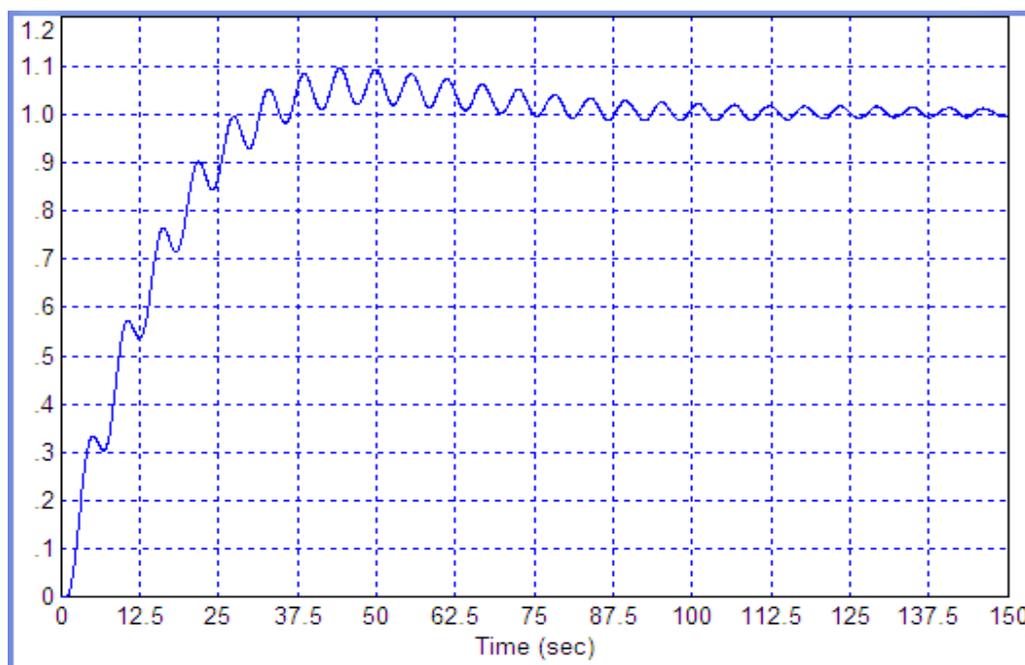


Рис. 12. Переходный процесс в системе с уменьшенным быстродействием объекта и датчика (гироскопа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа продолжает серию исследований по методам расчета регуляторов с помощью численной оптимизации [3–10].

В результате проделанных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Совмещение двух датчиков может позволить соединить их достоинства, устраняя их недостатки. Этот вывод можно распространить на большее количество датчиков. В данной работе при отсутствии широкополосного датчика положения (то есть датчика выходной величины с малой динамической ошибкой) используется датчик ускорения. Интегрирование ускорения дает скорость. Поэтому хотя в системе нет датчика непосредственно этой величины, можно условно считать, что имеется датчик скорости, как последовательное соединение датчика ускорения и интегратора. Другой способ вычисления скорости через дифференцирование сигнала с выхода датчика положения менее привлекателен, поскольку при дифференцировании высокочастотные шумы возрастают, тогда как при интегрировании они уменьшаются.

2. Датчик скорости, состоящий из датчика ускорения и интегратора, целесообразно замыкать с регулятором напрямую, минуя вычитающее устройство, вычисляющее ошибку управления. Ранее в литературе такой подход не встречался.

3. Расчет регулятора следует осуществлять с учетом всех отличий датчиков от их идеальной модели, кроме того, целесообразно ввести искусственное дополнительное увеличение запаздывание в объекте, что позволит обеспечить робастные свойства системы.

4. Приведенный пример показал эффективность предложенных решений.

Полученные результаты использованы в разрабатываемом роботе.

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», проект № 471.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [2] Жмудь В.А., Заворин А.Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент РФ RU 2554291 С1. Опубл. 27.06.2015. Бюлл. № 18.
- [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] 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.
- [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.
- [10] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> и <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oa0_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



Владимир Михайлович Семибаламут – директор ФГБУН «Геофизическая служба СО РАН». Область научных интересов и компетенций: автоматизация научного эксперимента, лазерная физика, геофизика, программное обеспечение, оптимизация.
E-mail: vladim28@yandex.ru



Виталий Геннадьевич Трубин - зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».
E-mail: trubin@ngs.ru

Control of Object with Feedback Loop Using Imperfect Position and Acceleration Sensors

Vadim Zhmud, Vladimir Semibalamut, Oleg Yadrishnikov, Vitaly Trubin

Abstract. The paper discusses the problem of balancing robot control loop with negative feedback. The controller (regulator) can be calculated by numerical optimization. Sensors of the controlled value are imperfect. Orientation angle sensor (gyroscope) has a limited speed, as well as binary quantization noise. An acceleration sensor (accelerometer) has the average drift value and Gaussian noise. None of these sensors is not sufficient to stabilize balancing of the robot effectively, but using of them both in a single control loop can achieve the required accuracy of control in static and dynamic. Method of sharing the two sensors to determine more accurately the single value, previously developed in theory, has been tested with simulation. Furthermore, the results are confirmed with their practical use with good effect.

Key words: automation, control, transient process, stability, quality of control, closed-loop system, the accuracy of the sensors, balancing robot, gyroscope, accelerometer

REFERENCES

[1] Zhmud V. A. Modelirovanie, issledovanie i optimizatsiya zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Monografija. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s. (Zhmud V.A. Simulation study and

optimization of locked systems of automatic control. Monograph. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. - 335 p.)

[2] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Struktura modeli dlja optimizatsii sistemy s obratnoj svyaz'ju. Patent RF RU 2554291 C1. Opubl. 27.06.2015. Bjull. № 18.

[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] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Method of designing energy-efficient regulators 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.

[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.

[10] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>